UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO RIBEIRO DOS SANTOS

Guia para Iniciantes na Aplicação da Técnica de Dinâmica de Sistemas

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO RIBEIRO DOS SANTOS

Guia para Iniciantes na Aplicação da Técnica de Dinâmica de Sistemas

Projeto de Diplomação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Profª. Drª. Gladis Bordin

Porto Alegre
2019

A Nilsa Teresinha, minha mãe, a pessoa mais forte e guerreira que conheço;
e minha maior incentivadora.

Agradecimentos

Primeiramente aos meus Pais, Claudioir Soares e Nilsa Teresinha, a minha irmã, Karen Cristina, que propiciaram todos os meios para que meu objetivo fosse alcançado, além de todo apoio e incentivo incondicional.

À minha namorada Raquel por estar comigo nessa longa jornada, com toda sua compreensão e apoio.

À Professora Gladis Bordin por todos os conselhos, incentivos e orientações precisas no decorrer desse trabalho.

Aos colegas e amigos que fiz na universidade, pelas conversas e trocas de informações.

Ao Laboratorio de Implantação Iônica - Instituto de Física - UFRGS, onde fui bolsista por quatro anos.

A Deus por me manter de pé nos momentos mais difíceis.

Resumo

A utilização dos programas de simulação não é suficiente para extrair o potencial máximo da técnica de Dinâmica de Sistemas, este trabalho apresenta um guia para iniciantes na aplicação da técnica. Identifica-se por meio de simulações o comportamento de sistemas complexos, através da estrutura do modelo e das interações entre as variáveis do sistema. Busca-se ao utilizar a Dinâmica de Sistemas analisar o sistema como um todo e não por partes. A técnica após dominada torna-se uma excelente ferramenta para tomadas de decisão e análise de políticas. No decorrer do trabalho apresenta-se os fundamentos conceituais da Dinâmica de Sistemas, por exemplo, o *Pensamento Sistêmico* que busca analisar sistemas como um todo e os *Círculos de Causalidade* que utilizados corretamente tornam-se uma ferramenta adequada para analisar comportamento de variáves qualitativamente. No trabalho descreve-se também os passos para a construção, validação e aplicação de políticas em um modelo, posteriormente apresenta-se dois programas para simulação, Vensim e Powersim.

Palavras-chave: dinâmica de sistemas, modelo, variáveis, comportamento.

Abstract

The use of simulation programs is not enough to extract the maximum potential of the technique of Systems Dynamics, this work presents a guide for beginners in the application of the technique. The behavior of complex systems, through the structure of the model and the interactions between the system variables, is identified through simulations. We seek to use System Dynamics to analyze the system as a whole and not by parts. The after-dominated technique becomes an excellent tool for decision-making and policy analysis. In the course of this work we present the conceptual foundations of System Dynamics, for example, *Systemic Thinking* which seeks to analyze systems as a whole and the *Causality Circles* that are used correctly become an adequate tool to analyze behavior of variables qualitatively. The work also describes the steps for the construction, validation and application of policies in a model, later presents two programs for simulation, Vensim and Powersim.

Keywords: system dynamics, model, variables, behavior.

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Sumário

1 Introdução

1.1 Motivação

A possibilidade que a Dinâmica de Sistema fornece de modelar e analisar sistemas complexos, podendo, através de suas relações de causa e efeito, analisar como as variáveis do sistema se inter-relacionam, e indicar quais variáveis geram alavancagem no sistema, tornando as ações mais eficientes. Esta ferramenta é importante para descrever o comportamento de sistema reais e sua aplicação ainda é restrita no Brasil na área de Engenharia Elétrica.

1.2 Apresentação do Problema

Existem diversos *programas* para realizar simulações com a Dinâmica de Sistemas como, por exemplo, Vensim, Powersim, Stella e etc. Estes possuem tutoriais que auxiliam o usuário a utilizar o *programa*. Em geral, com estes *programas* pode-se vizualizar qualquer variável do modelo ao longo do tempo, na forma de tabelas ou gráficos. Porém ao gerar estes resultados um usuário iniciante, sem o conhecimento prévio da técnica, pode cometer erros ou equívocos ao analisar dados obtidos na simulação, por este motivo é imprescindível que este usuário obtenha o conhecimento teórico dos conceitos essencias da Dinâmica de Sistema, podendo assim obter o máximo potencial que esta ferramenta pode proporcionar.

1.3 Objetivo

Apresentar a técnica de Dinâmica de Sistemas, como um guia para iniciantes na aplicação da mesma, e contribuir como uma referência bibliográfica inicial para trabalhos que pretendam adotar a Dinâmica de Sistema como base conceitual.

1.4 Metodologia

O presente trabalho implementa um modelo empregando os conceitos da Dinâmica de Sistemas nas ferramentas computacionais. Possibilita-se com a utilização da técnica a análise de variáveis ao longo do tempo através de suas interações, relações causais e laços de realimentação, em detalhes nos programas Vensim e Powersim.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos, incluindo esse introdutório, divididos da seguinte forma.

No Capítulo 2 é realizada a revisão dos conceitos da Dinâmica de Sistemas, apresenta-se os elementos essencias para sua aplicação e suas definições.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia e as ferramentas computacionais utilizados no trabalho, dá-se a orientação a iniciantes na aplicação da técnica e utilização dos *programas*.

No Capítulo 4 descreve-se os passos para a construção do modelo. Neste capítulo também, realiza-se simulações e análises do modelo aplicando as técnicas da Dinâmica de Sistema.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho.

2 Considerações sobre dinâmica de sistemas

Este capítulo apresenta os conceitos básicos de Dinâmica de Sistema (DS) e informações sobre seu uso. Para tanto, na aplicação da técnica é necessário inicialmente conceituar o pensamento sistêmico.

2.1 Pensamento Sistêmico

Em 1990 Peter Senge publicou o livro *"A Quinta Disciplina – A arte e a Prática da Organização que Aprende"*, revolucionando o meio das grandes organizações, segundo Senge (2014) resolver uma situação complexa separando-a em partes torna esta situação mais administrável, por outro lado, perde-se a noção do todo, impossibilitando visualizar o resultado das ações. Através de sua obra Senge desenvolveu cinco disciplinas que proporcionam um conjunto de ferramentas, que possibilita a construção das organizações que aprendem, organizações que aumentam sua capacidade de obter metas desejadas, novas aspirações e aprendizagem coletiva.

As cinco disciplinas desenvolvidas por Senge (2014) são transcritas e descritas a seguir.

1. *Domínio Pessoal*: é a disciplina voltada para o crescimento e aprendizado pessoal. Senge menciona que o aprendizado individual não garante o aprendizado organizacional, mas sem ele, não existe aprendizado organizacional.

Esta disciplina proporciona ao indivíduo esclarecer o que é importante para si, revela para o indivíduo se o caminho percorrido é o caminho planejado. Segundo Senge (2014), nesta disciplina, define-se visão e realidade atual como *"o que queremos"* e *"onde estamos com relação ao que queremos* estas duas definições em conjunto são chamadas de *Tensão Criativa*, aprender a produzir e suprir a tensão criativa, de acordo com o autor é a essência do domínio pessoal.

Segundo Senge (2014), um alto nível de domínio pessoal leva o indivíduo a aprimorar suas habilidades, por exemplo, potencializa a intuição, aumenta a rapidez no aprendizado, há um profundo comprometimento com metas, por este motivo, algumas organizações estimulam a prática do domínio pessoal entre seus colaboradores visando um possível fortalecimento na empresa.

Senge (2014), menciona que a prática do domínio pessoal no meio corporativo leva a mudanças radicais na relação entre funcionários e instituição, o autor descreve que é preciso que líderes e colaboradores obtenham modelos mentais e visões compartilhadas em sintonia, caso contrário pode ocorrer um eventual estresse organizacional. Além disso,

Senge menciona que não é possível quantificar os resultados obtidos com a aplicação da disciplina, por seus conceitos serem abstratos. Por este motivo, apesar dos benefícios que a prática da disciplina proporciona, tanto ao indivíduo quanto as organizações de modo geral, ainda existe um número expressivo de pessoas e organizações que resistem a sua aplicação.

2. *Modelos Mentais*: são pressupostos profundamente arraigados, generalizações ou mesmo imagens que influenciam na forma de como as pessoas veem e agem no mundo, estes modelos refletem internamente imagens do mundo que a pessoa tem. Senge (2014) relata que a estagnação dos modelos mentais profundamente enraizados pode dificultar a aprendizagem levando empresas ao congelamento de ideias e a práticas obsoletas.

Para exemplificar o autor descreve um estudo realizado em um grande fabricante de bens manufaturados dos Estados Unidos que estava perdendo participação no mercado. A política da produção do fabricante obedecia a demanda, havendo aumento nos pedidos a produção e o estoque seriam aumentados, caso houvesse uma diminuição nos pedidos a produção e o estoque seriam diminuidos. Após utilizar-se a técnica de Dinâmica de Sistema, foi detectado que havia problemas de atraso e confiança na entrega dos produtos, a simulação previu que atrasos aumentariam mais com a demanda menor, do que quando houvesse uma demanda maior dos pedidos, contrariando o pensamento convencional. Senge relata que após estudo, adotou-se uma nova política sobre a produção, aprovada pela alta gerência do fabricante, a partir daquele momento a produção iria mantér-se independente da demanda e as entregas receberiam uma maior atenção.

Ainda, Senge menciona que, com esta nova política o fabricante aumentou sua participação no mercado, adquirindo novos clientes e realizando entregas imediatas, porém as novas políticas não foram realmente incorporadas, e obteve-se apenas uma melhora temporária. Após uma nova baixa nos pedidos a antiga política do fabricante foi novamente aplicada, diminuindo a produção juntamente com a demanda. Senge menciona que mesmo a alta gerência observando as melhorias obtidas com a nova política, era de conhecimento comum entre os gerentes que a responsabilidade de ter produtos estocados não vendidos era de carater prejudicial a suas carreiras, demostrando que os modelos mentais da gerência continuavam enraizados, resultando em um retrocesso na empresa.

De acordo com Senge (2014), as habilidades de reflexão "consistem em desacelerar nosso próprio processo do pensamento, a fim de que possamos nos tornar mais conscientes de como formamos nossos modelos mentais e de que forma eles influenciam nossas ações ", Senge também descreve as habilidades de indagação como aquela que enfrenta situações complexas e conflituosas entre pessoas que interagem, segundo o autor estas habilidades são essencias para a disciplina.

O autor menciona também que não é possível extrair o potencial máximo do pensamento sistêmico sem o domínio dos modelos mentais, já que estes se completam.

Os modelos mentais trazem à tona imagens, modelos ocultos, em quanto o pensamento sistêmico destaca alternativas para remodelar o modelo, buscando apontar motivos de problemas relevantes, a integração entre as disciplinas proporciona desenvolver modelos mentais que identificam padrões de mudança a longo prazo, expondo também as causas que geram estes padrões.

3. *Visão Compartilhada*: Nenhuma organização mantém-se líder no mercado sem valores, missões e metas excessivamente compartilhadas entre pessoas participantes da organização, esta disciplina volta-se para formação de uma identidade comum entre pessoas, visando o propósito maior da organização.

Segundo Senge (2014), para obter-se o domínio da disciplina, inicialmente deve-se esquecer ideias convencionais, onde a visão originada na alta gerência não era compartilhada entre os colaboradores da organização, bastava que esses colaboradores soubessem as tarefas a serem executadas para dar apoio a visão. Senge menciona *"Os indivíduos não sacrificam seus interesses pessoais em prol da visão maior do grupo; ao contrário, a visão compartilhada torna-se uma extensão de suas visões pessoais"*.

O autor também menciona que o domínio pessoal é de suma importância para o desenvolvimento da disciplina, a visão compartilhada baseia-se na visão pessoal e tensão criativa, teorias fundamentais do domínio pessoal. De acordo com Senge (2014) a visão compartilhada *"pinta o quadro do que queremos criar"*, e o pensamento sistêmico *"revela como criamos o que temos no momento"*, o autor relata também que a visão compartilhada quando não aplicada juntamente com o pensamento sistêmico perde sustentação.

4. *Aprendizagem em Equipe*: esta disciplina começa pelo diálogo, a capacidade dos membros de deixarem de lado as ideias preconcebidas e participarem de um verdadeiro pensar em conjunto, esta disciplina é um ponto crucial, porque caso as equipes nao obtenham a habilidade de aprender, as organizações não o terão.

De acordo com Senge (2014) *"A aprendizagem em equipe é o processo de alinhamento e desenvolvimento da capacidade da equipe de criar o resultados que seus membros realmente desejam"*, o autor menciona também que esta disciplina baseia-se nas disciplinas visão campartilhadas e dominio pessoal.

5. *Pensamento Sistêmico*: é um conjunto de conhecimentos e ferramentas desenvolvidos ao longo dos ultimos anos 50 anos para analisar partes inter-relacionadas, esclarecer padrões como um todo e como modificá-los efetivamente.

De acordo com Senge (2014) é necessário que as disciplinas atuem como um todo para atingir seu máximo potencial. O pensamento sistêmico é considerada a quinta disciplina, aquela que agrega todas as outras, aproxima a teoria da prática. Senge (2014) menciona que sem uma visão sistemática não há motivos para analisar a inter-relações entre as disciplinas.

Como bem assegura o autor, pode-se dizer que o pensamento sistêmico é uma método para analisar as inter-relações entre as variáveis de um sistemas, nesse contexto, fica claro que o papel fundamental é ver as interações entre essas variáveis, notar a influência que elas geram entre si, visualizar os processos de mudança. Contudo, é possível constatar que o maior objetivo é enxergar o problema como um todo, dessa maneira é possível resolver problemas com sistemas mais complexos.

Não é exagero afirmar que o pensamento sistêmico é de suma importância em organizações, devidos suas características, podendo através de um estudo analisar causas e efeitos de um determinado caso, de modo a esclarecer como se inter-relacionam, indicando suas possíveis mudanças a longo e curto prazo.

2.1.1 Círculos de Causalidade

Senge (2014) define complexidade dinâmica como *"situações nas quais causa e efeito são sutis, nas quais os efeitos das intervenções, ao longo do tempo, não são óbvios"*, sistemas que encontram-se com esta complexidade tem a característica de não obter respostas lineares, uma mesma ação gera efeitos distintos a longo e a curto prazo, estes sistemas não serão analisados por métodos tradicionais, como o pensamento linear. Senge relata que para obter-se uma visão geral do sistema, analisar as interações das variáves, identificar as forças que provocam mudanças e vizualizar além dos eventos, é necessário uma linguagem feita de círculos. Para ilustrar, Senge (2014) exemplifica um simples círculo de causalidade na Figura 1, através da regulagem da água para encher o copo.

Na Figura 1 deve-se percorrer o círculo para interpretar o diagrama, consider-se inicialmente que o copo esta vazio. Inicia-se primeiramente observando o nível desejado de água, observa-se que a diferença percebida é grande, então ajusta-se a posição da torneira aumentando o fluxo de água e o nível atual da água. À medida que o nível da água aproxima-se do nível desejado, a diferença percebida é menor e ajusta-se a posição da torneira diminuindo o fluxo de água, quando o copo estiver cheio por completo fecha-se a torneira completamente.

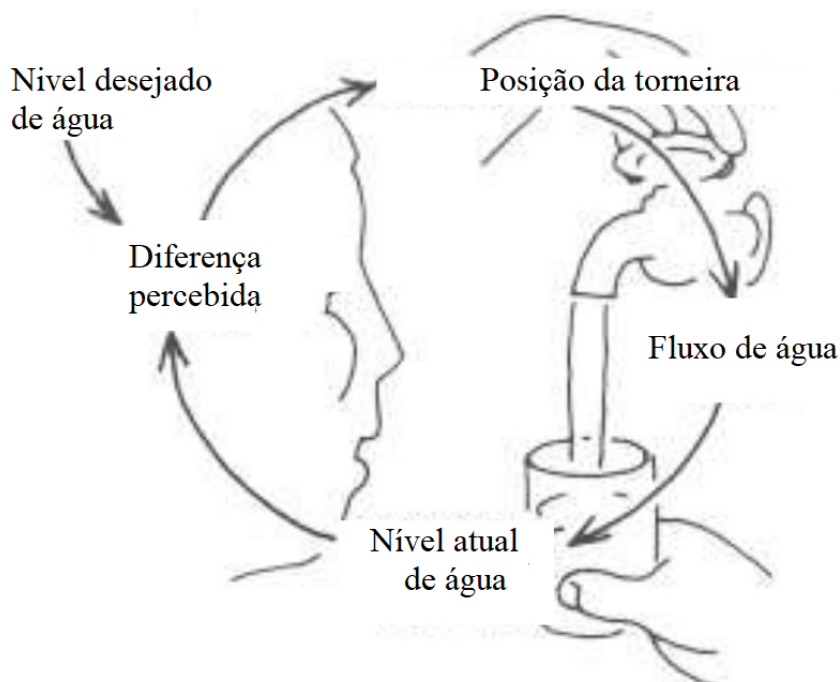
Senge menciona que este simples sistema envolve 5 variáveis: diferença percebida, nível desejado de água, posição da torneira, fluxo de água e nível atual de água. Estas variáves estão arranjadas em círculos de causa e efeito, formando laços de realimentação.

2.1.2 Laços de Realimentação

Como bem assegura Senge (2014), existem três conceitos básicos para a aplicação da visão sistêmica, são eles: laço de reforço, laço de equilíbrio e a defasagem.

O laço de Reforço é aquele que serve como um amplificador, tem a característica de gerar seu próprio crescimento, qualquer movimento produzido é amplificado na mesma

Figura 1 – Círculo de Causalidade



Fonte: Senge (2014)

direção, esta direção pode ser no sentido de crescimento ou declínio, o laço de reforço tem a característica de que qualquer ação realizada pelos componentes do sistema, sendo esta ação pequena ou não, podem gerar grandes consequências, este laço é conhecido como *"bola de neve"* por ter seu crescimento ou declínio acelerados (SENGE, 2014).

A Figura 2 apresenta um exemplo de um diagrama de laço de reforço, nela pode-se observar um diagrama de círculo de reforço, referente a vendas de algum produto havendo uma propaganda boca a boca entre os clientes, para interpretar este diagrama deve-se percorrer o círculo.

Inicia-se o trajeto considerando que o produto vendido seja de alta qualidade, os clientes consomem este produto, ficam satisfeitos gerando uma propaganda boca a boca positiva sobre o produto, então as vendas irão aumentar gerando mais clientes satisfeitos e mais propaganda, tornando este sistema um círculo virtuoso, por este motivo pode-se observar que as ações realizadas pelos componentes do sistema geram um crescimento, um efeito *"bola de neve"*.

Por outro lado, este mesmo diagrama pode ser analisado de uma outra forma, caso tenha um produto de baixa qualidade, nosso sistema se tornará um círculo vicioso, onde as vendas geram clientes nada satisfeitos, gerando um aumento da propaganda negativa diminuindo as vendas e assim por diante, levando o sistema ao declínio.

Figura 2 – Laço de Reforço

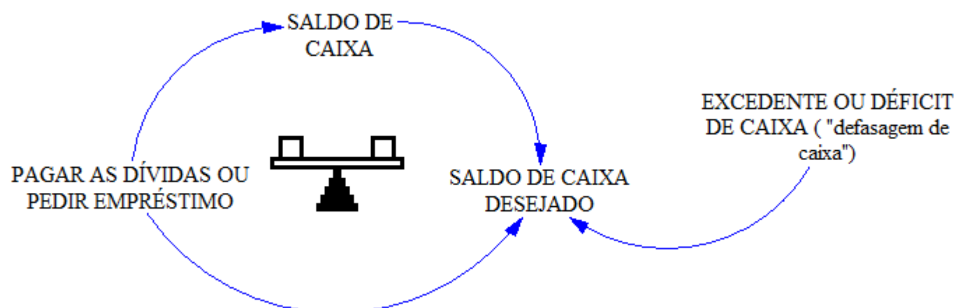


Fonte: Senge (2014)

Senge (2014) descreve que nenhum sistema cresce ou descresce infinitamente, estes sistemas encontram algum limite, que interrompe ou desacelera seu crescimento ou declínio, este limite é conhecido como Laço de Equilíbrio, este tem como objetivo estabilizar o sistema, normalmente se opõem a mudanças entrando em ação quando existe uma meta a alcançar.

Para Senge (2014) laços de equilíbrio são difíceis de detectar, diferentemente dos laços de reforço, nos laços de equilíbrio tem-se a percepção que nada esta acontecendo, mas não é isso que ocorre, Senge (2014) *"o processo de equilíbrio mantém o status quo, mesmo quando todos os participantes querem mudanças"*. A Figura 3 apresenta um exemplo de laço de equilíbrio.

Figura 3 – Laço de Equilíbrio



Fonte: Senge (2014)

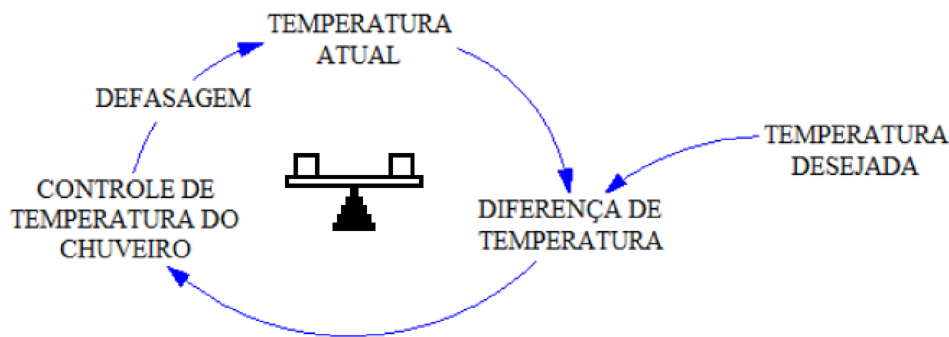
Na Figura 3 pode-se observar um laço de equilíbrio referente ao ajuste de saldo de uma caixa, para interpretar este diagrama percorre-se o círculo, mas desta vez, diferentemente do exemplo anterior, começa-se pela diferença entre o valor atual e a meta

pretendida. Então, no exemplo tem-se uma diferença entre o saldo da caixa e o saldo desejado, para solucionar o caso em questão solicita-se um empréstimo, com isso aumenta-se o saldo da caixa, diminuindo a diferença com o saldo desejado. Pode-se considerar que essas metas mudam ao longo do tempo, independente desta dinâmica, o laço de equilíbrio continua realizando os ajuste entre o saldo da caixa e o saldo desejado.

Conforme Senge (2014), o tempo entre uma ação e suas consequências, o tempo entre o efeito das interações de uma variável sobre a outra é considerado Defasagem ou Atraso. O autor mostra que estas defasagens atuam em todos os lugares e estão presentes em todos os processos de realimentação.

As defasagens podem levar um sistema à instabilidade caso não sejam detectadas, na Figura 4 é possível verificar um exemplo de um diagrama de círculo de equilíbrio com defasagem.

Figura 4 – Laço de Equilíbrio com Defasagem

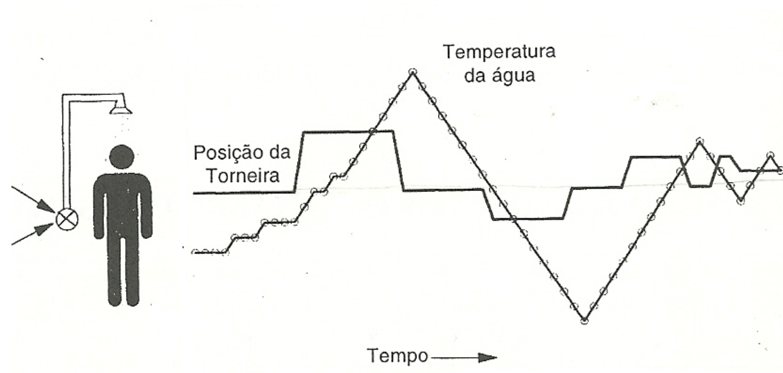


Fonte: Senge (2014)

No diagrama circular da Figura 4 quer-se ajustar a temperatura da água do chuveiro, porém a uma defasagem entre o controle de temperatura e a temperatura atual, conforme a torneira é aberta, não recebe-se nenhuma informação e a água permanece fria, a ação não gerou nenhum resultado, então repete-se a ação e a torneira é aberta ainda mais, ocorre que quando recebe-se a água, ela esta numa temperatura muito elevada porque houve uma defasagem entre o efeito da nossa ação e a resposta do sistema, nesse mesmo instante fecha-se a torneira para equilíbrar a temperatura e novamente o registro é aberto tentando corrigir a temperatura, ate que seja encontrada a temperatura desejada, na Figura 5 apresenta-se um gráfico com essa situação.

Pode-se observar na Figura 5 que as consequências da defasagem geram picos na saída (*overshoot*), podendo levar o sistema a instabilidade. Este atraso pode ser um causador de problemas no sistema, quando o mesmo ocorre no processo de tomada de decisão (STERMAN, 2000 apud JANSEN, 2009).

Figura 5 – Gráfico da Defasagem



Fonte: Pidd (1998)

2.2 Dinâmica de Sistema

Dinâmica de Sistema (DS) é uma técnica que visa analisar, modelar, simular e identificar comportamentos implícitos em sistemas dinâmicos complexos ao longo do tempo, serve para criar modelos que representam sistemas (*estruturas*) existentes na natureza.

De acordo com Matos (2012), utilizando a DS é possível compreender a natureza dinâmica de um sistema, entender e aperfeiçoar seu desempelho, trata-se de uma modelagem matemática capaz de obter a resposta de um sistema dinâmico.

Para obter um maior entendimento do que é a DS, esclarece-se os significados das palavras sistema e dinâmica. Segundo Pidd (1998), sistema é um conjunto de componentes interdependentes, inter-relacionados e organizados, suas relações são fixas entre os componentes, podendo gerar outros sistemas, o mesmo não possui limitação de tamanho nem de números de componentes, podendo se adequar a necessidade do modelo. Para Felício (2010), definir as fronteiras de aplicação do sistema é algo de suma importância, definindo estas fronteiras é possível desenvolver o possível modelo do sistema proposto, a quantidade de componentes que pertencem ao sistema e seu grau complexidade.

Conforme Felício (2010) a dinâmica estuda o comportamento de variáveis em função do tempo, mesmo esta variável sendo uma constante que não se altera em função do tempo. Deste modo, segundo Villela (2005) pode-se concluir que a Dinâmica de Sistema estuda o comportamento de sistemas em função do tempo, podendo este sistema ter ‘n’ elementos inter-relacionados e interdependentes.

2.2.1 Para que serve?

Segundo Jansen (2009), a DS pode ser aplicada em qualquer sistema dinâmico, uma excelente ferramenta para análises a longo prazo, tem como seu principal objetivo analisar

questões através de vários observadores, possibilitando extrapolar limites dos modelos mentais tento o intuito de observar as consequências e os possíveis efeitos relacionados as ações causadas pelos componentes do sistema.

De acordo com Villela (2005), a Dinâmica de Sistemas tem um amplo campo de atuação podendo ser aplicada em diversas áreas, por exemplo Ciências (sociais e físicas), biológicas, Química e na Engenharia. Vale lembrar que estruturas onde o ser humano faz parte dos componentes do sistema, há um aumento no nível de complexidade, devido a dificuldade de modelar o comportamento dos seres humanos.

Conforme Pidd (1998), "a Dinâmica de Sistemas é uma das ferramentas disponíveis para as pessoas que desejam pensar a respeito das consequências de suas possíveis ações", através dessa analise é possivel elevar o nível de conhecimento dos componentes do sistema, sua forma de organização, operação e como interagem entre si.

2.2.2 Onde estudar?

Ao iniciar o estudo sobre DS, recomenda-se conhecer a obra de Jay Forrester, o livro (*Industrial Dynamics, 1961*), Forrester (1961), onde o autor apresentou uma nova forma de simular sistemas (ALVES, 1997). A DS difundiu-se com a publicação dos livros (*Urban Dynamics, 1969*), Forrester (1969), e (*World Dynamics, 1971*), Forrester (1971). Demostra-se através de suas obras a possibilidade de simular sistemas que abordam diferentes áreas num único sistema.

Sugere-se também conhecer a obra de Peter Senge com o livro, *(A Quinta Disciplina – A arte e a Prática da Organização que Aprende, 1990)*, onde desenvolveu-se o *Pensamento Sistêmico* que utiliza as ferramentas da DS para criar uma nova análise das organizações e John David Sterman que publicou o livro, (*Business Dynamics: Systems Thinking e Modeling for a Complex World, 2000*) que utiliza a DS para área de negócios.

2.2.3 Conceitos de Dinâmica de Sistema

Para aplicar à Dinâmica de Sistema necessita-se compreender os componentes do sistema, suas variáveis, e o tipo de relações que existe entre eles, conforme Pidd (1998) deve-se considerar os laços de realimentação e as possíveis defasagens *(atrasos)* no recebimento e transmissão de informações do sistemas.

De acordo com Pidd (1998), o primeiro passo para a utilização da Dinâmica de Sistema é compreender os Laços de Realimentação que fazem parte dos sistemas a serem estudados, já que estes proporcionam um entendimento do comportamento do sistema, para facilitar a compreensão e a visualização da interação dos componentes do sistema utiliza-se os Diagramas de Laço Causal.

O Diagrama de Laço Causal é uma excelente ferramenta para identificação das relações de causa e efeito, Laços de Realimentação e Atrasos, que ocorrem no sistema dinâmico, o Diagrama de Laço Causal possibilita realizar uma análise qualitativa do sistema.

Caso pretenda-se realizar análises quantitativas utiliza-se os Modelos de Estoque e Fluxo, o mesmo tem como sua principal característica a utilização da formulação matemática para representar o comportamento do sistema (VILLELA, 2005).

Estes conceitos essenciais para a aplicação da técnica da Dinâmica de Sistema aqui apresentados, Diagrama de Laço Causal e Modelo de Estoque e Fluxo, decorrerá individualmente nas próximas seções.

2.2.3.1 Diagrama de Laço Causal

O Diagrama de Laço Causal (DLC) é uma técnica que possibilita realizar uma análise qualitativa, é utilizado principalmente para reproduzir uma descrição dos componentes do sistema, suas variáveis, estas que ao se relacionarem geram o comportamento do sistema, com isso é possível compreender seu funcionamento. De acordo com Pidd (1998), o diagrama de laço causal pode ser modelado de uma forma simples, considerando que a compreensão da estrutura do sistema seja realizada de forma geral e não considerando os detalhes do sistema.

Coyle (2000 apud JANSEN, 2009) apresenta algumas vantagens na utilização dos Diagramas de Laço Causal:

- através do diagrama é possível identificar padrões de realimentação, mesmo que não seja possível prever a dinâmica do sistema, ainda é de grande utilidade;

- pode servir como base inicial para uma simulação;

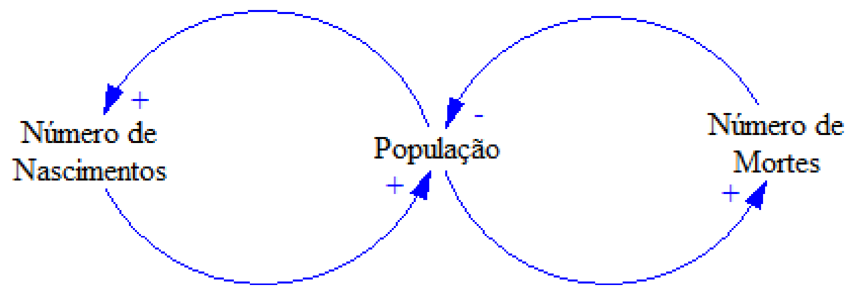
- pode representar um sistema complexo em uma folha de papel;

- pode ser usado como uma agenda eficaz para a discussão de um problema.

Para aplicar-se a técnica e construir os diagramas são necessárias algumas convenções, por exemplo, segundo Sterman (2000 apud JANSEN, 2009) quando representar as ligações causais de reforço ou equilíbrio estes terão polaridades em suas setas, a ligação de reforço terá um sinal positivo *(+)* e a ligação de equilíbrio terá um sinal negativo *(-)*. Para facilitar a compreenção segue exemplo dessas convenções na Figura 6.

Na Figura 6 observa-se que os sinais nas pontas das setas, indicam a relação de causa e efeito entre as variáveis do sistema, por exemplo, ao aumentar o número de nascimentos, a população também aumentará, percebe-se que existe uma relação positiva de reforço entre as variáveis *Número de Nascimento, variável causal, e População*, variável afetada, a ponta da seta que indica a ligação terá o sinal positivo *(+)*. Por outro lado, ao

Figura 6 – Diagrama de Laço Causal



Fonte: Alves (1997)

aumentar o numero de mortes a população diminui, a relação entre as variáveis *Número de Mortes*,variável causal, e *População*, variável afetada, é negativa, lembra-se que nenhum sistema cresce infinitamente precisa-se de um fator de equilíbrio, a ponta da seta que indica essa ligação terá o sinal negativo *(-)*.

Segundo Bordin (2000) *"Os sistemas reais possuem características de realimentação onde as variáveis afetadas podem influenciar as variávies causais, representando uma sucessão de relações de causa-efeito circulares. Os modelos em DS dizem respeito a sistemas dotados desta relação"*, observa-se no DLC da Figura 6, que o mesmo possui dois laços de realimentação.

Bordin (2000) menciona que para determinar as polaridades do laço causal existem dois métodos:

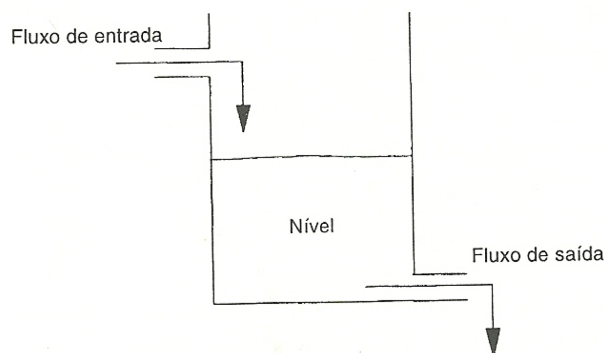
- Primeiro: deve-se manter o sistema constante e manipular alguma variável, observar o efeito das variáveis presente no laço, caso esta mudança reforce a alteração realizada pela variável manipulada, o laço é de reforço, caso contrário o laço é de equilibrio.

- Segundo: observa-se as polaridades das ligações causais, se o número de ligações negativas for impar o laço é de equilíbrio, caso contrário é laço de reforço.

2.2.3.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

De acordo com Pidd (1998), em 1961 Forrester baseou-se em dois conceitos para desenvolver modelos de sistemas em DS, são eles: variáveis de estoque (ou nível) e variáveis de fluxo (taxas). Segundo o autor variáveis de estoque são acumulações de recurso, fisícos ou não-fisícos, onde descreve-se resultados das ações do sistema, a variável de fluxo de acordo com o autor, são meios para movimentar recursos, de modo a produzir crescimento ou redução do estoque. Observa-se na Figura 7 esta relação.

Figura 7 – Nível e Razão de Fluxo



Fonte: Pidd (1998)

No exemplo proposto, observar-se um tanque preenchido com algum líquido. Nota-se que há um fluxo de líquido de entrada e outro de saída, à medida que houver diferença entre os fluxos ocorrerá mudanças no nível do tanque, por exemplo, o fluxo de entrada sendo superior ao fluxo de saída, resultaria em um aumento no nível do tanque, caso contrário haveria diminuição no nível do tanque.

Segundo Pidd (1998), o estado do sistema, em qualquer instante do tempo, descreve-se através dos níveis. O autor também menciona que independente da inexistência do fluxo em algum ponto do tempo, o nível permanecerá, por exemplo, anula-se o fluxo de entrada ou de saída da Figura 7, os níveis permaneceriam em algum valor constante. Não havendo atividades no sistema, obtém-se o fluxo zerado diferentemente dos níveis (PIDD, 1998).

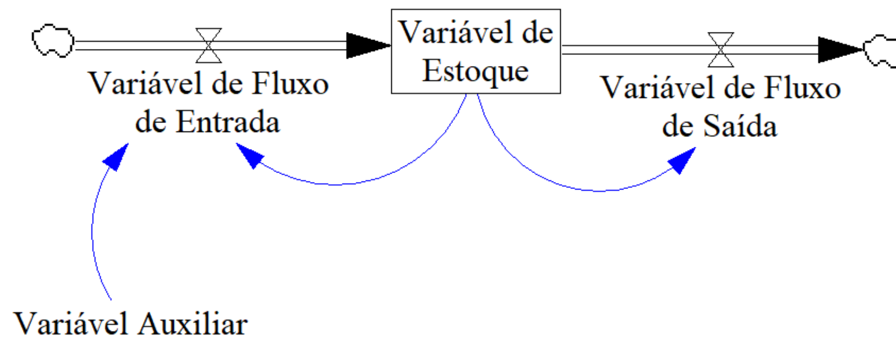
Pidd (1998) relata que em Forrester (1961) o autor desenvolvia a abordagem da Dinâmica de Sistemas com intuito de criar diagramas de modelos, tendo em vista elaborar um conjunto de equações que assegurar-se a simulação do sistema. O objetivo essencial dos Diagramas de Estoque e Fluxo (DEF) de acordo com o autor, é representar a relação das variáveis de nível e fluxo. o autor descreve que Forrester desenvolveu quatro elementos principais para o DEF, *Variável de Estoque, Variável de Fluxo, Variável auxiliar, Conectores (Setas).* Na Figura 8 visualiza-se os simbolos dos elementos com auxilio do software VENSIM que será explanado em próximos capítulos.

De acordo com Sterman (2000 apud SANTOS, 2006):

- *Variável de Estoque*: representada por retângulos segundo a Figura 8, são acumulações de fluxos ao longo do tempo.

- *Variável de Fluxo*: a taxa de fluxo controla a velocidade com que no nível do estoque sofre alterações, são regulados por válvulas como visto na Figura 8, as pontas do diagrama estão fora do limite do modelo, representam o início e fim do fluxo, quando não influenciam o sistema são representados por nuvens.

Figura 8 – Diagrama de Estoque e Fluxo



Fonte: Vensim Version 7.2a

- *Variável auxiliar*: são variáveis embasadas em outras variáveis ou elementos do sistema.

- *Conectores (Setas)*: são responsáveis por transportar informações de um elemento para outro, carrega valores de entrada para formular o equacionamento das variáveis de estoque, auxiliares e de fluxo, determina o vínculo existente entre as variáveis do modelo (SANTOS, 2006).

2.2.4 Modelagem dos Sistemas

Pidd (1998) elaborou um conjunto de princípios empregados para o desenvolvimento de modelos, o autor menciona que não são regras, são ideias para auxiliar o indivíduo a ponderar alguns pontos. O autor também relata, que incorporar inconscientemente e personalizar este conjunto de princípios é de essencial importância.

Os seis princípios desenvolvidos por Pidd são:

Modele simples, Pense complicado: um modelo não deve ser tão complicado quanto o sistema modelado. O objetivo do modelo é torna-se compreensível e útil para o usuário. Deve-se analisar e avaliar criteriosamente este modelo.

Seja parcimonioso, comece pequeno e acrescente: deve-se iniciar o modelo com ponderações simples, um modelo geral, conforme ocorram-se complicações adiciona-se complexidade ao modelo.

Divida e conquiste, evite megamodelos: assemelha-se ao princípio anterior, recomenda-se adotar modelos pequenos e controláveis do que modelos grandes.

Use metáforas, analogias e similaridade: procura-se trazer experiências passadas para criação do modelo, pontos de vistas diferentes, imagina-se fazendo parte do modelo.

Não se apaixone pelos dados: aconselha-se não conduzir um modelo pelos dados, ao desenvolver o modelo recomenda-se pensar em príncípios e paramêtros para o mesmo, após reflete-se sobre o tipo de dados necessários.

A construção do modelo pode ser como desenredar-se: enquanto constrói-se a modelo é necessário aprimorar as ideias.

3 Construção do Modelo

Com a finalidade de orientar iniciantes na aplicação da DS apresenta-se os passos para a aplicação da técnica. Além disso existe a necessidade de analisar o comportamento das interações das variáveis ao longo do tempo, para isto faz-se uso de programas para simulações.

3.1 Passos para a Construção do Modelo

De acordo com Ford (1999 apud BORDIN, 2000) para a construção e validação dos modelos segue-se oitos passos, descritos a seguir:

Aquisição de Conhecimentos sobre o sistema: Nesse primeiro passo, encontra-se o momento de identificar todas as relações que regem o sistema, tenta-se descobrir as variáveis que mais afetam o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Modo de Referência: No segundo passo deve-se elaborar um gráfico variando no tempo com a variável mais imprescindível do modelo.

Construção do DLC: O terceiro passo a seguir destina-se a construção do DLC, com o intuito de identificar as ligações causais entre as variáveis e os laços de realimentação, possibilitando analisar qualitativamente o modelo.

Construção do DEF: No quarto passo ao construir o DEF deve-se seguir algumas regras. Inicialmente define-se as *variáveis de estoque* seguidas das *variáveis fluxo*, após as variáveis constantes e demais variáveis do modelo. Deve-se tomar cuidado ao equacionar as variáveis levando em consideração suas unidades.

Não existe regra definindo a ordem de construção dos DFE e DLC, fica a escolha do desenvolvedor. No presente trabalho utiliza-se a ordem descrita acima.

Estimativa dos Valores dos Parâmetros: O quinto passo trata-se da confiança dos parâmetros. Deve-se estimar individualmente cada parâmetro, utiliza-se quaisquer referência disponível. Pode-se trabalhar com parâmetros de 100% a 10% de precisão ou precisão absolutamente indefinida. Não retira-se do modelo variáveis com parâmetros indefinidos, pode-se posteriormente aprimorar esta precisão

Verificacão da Consistência: No sexto passo, deve-se simular o modelo comparando os resultados como o Modo de Refêrencia. Verifica-se o comportamento do modelo, caso o resultado asemelha-se ao modo de referência, pode-se dizer que o modelo é consistente.

Análise de Sensibilidade: No sétimo passo efetua-se os testes de sensibilidade. Muda-se os parâmetros do modelo diversas vezes buscando determinar quais variáveis apresentam maior importância no sistema. Busca-se identificar se o modelo é robusto.

Segundo Baugarten (2014) para aplicar a Análise de Sensibilidade recomenda-se alguns passos:

1. Alterar os parâmetros com certa proporção, por exemplo, +10% ou -10% do valor do referência do parâmetro e simula-se cada caso.

2. Identificar quais parâmetros atuam de forma expressiva no comportamento do sistema.

3. Verificar se as alterações estão de acordo com a teoria.

Testes de Políticas: No oitavo passo efetua-se os testes sobre as políticas. Simula-se o modelo diversas vezes alterando os parâmetros relacionados a variáveis políticas. Busca-se determinar qual variável tem maior impacto no resultado.

3.2 Ferramentas Computacionais

Através das ferramentas de simulação observa-se a interação dos elementos do modelo propiciando identificar variáveis que causam maior ou menor alavancagem no sistema. Com isso a DS torna-se efetiva nas tomadas de decisões e na concepção de novas políticas.

Neste capítulo apresenta-se os programas utilizados no trabalho.

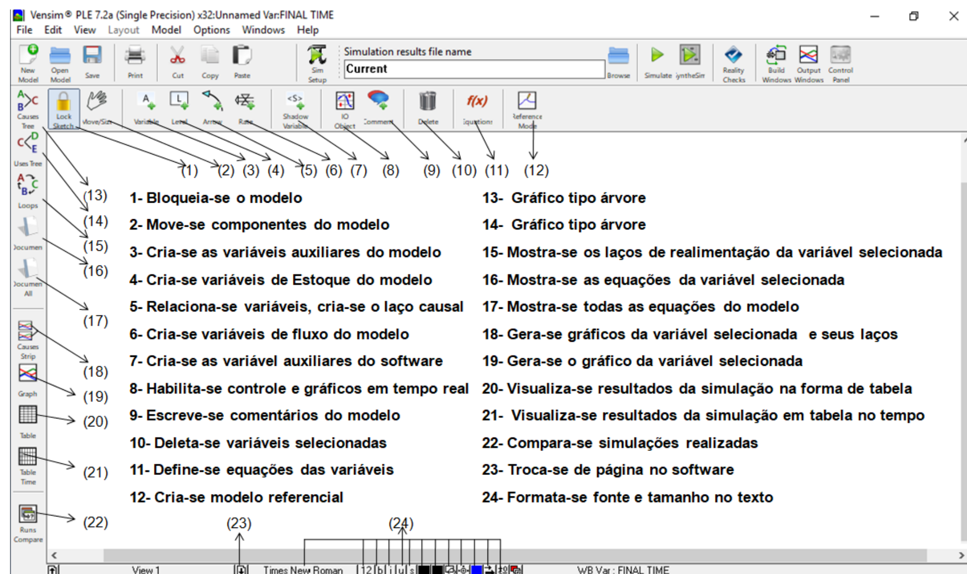
3.2.1 Programa Vensim

O Vensim elaborado pela empresa Ventana Systems Inc, segundo Vensim (2017), permite analisar e desenvolver modelos da DS. O programa proporciona uma interface acessível. Elabora-se gráficos e tabelas com facilidade, o programa suporta windowns (XP/Vista/7/8/8.1/10) e Macintosh OSX (10.9+).

O Vensim apresenta-se em quatro versões, são elas: PLE, PLE Plus e o Professional e DSS. Dependendo da versão as barras de ferramentas dispõem-se de aparência e funções diferentes. Utiliza-se, neste trabalho, a versão estudante 7.2a do Vensim PLE. Encontra-se a seguir o guia para utilização do programa.

As principais ferramentas e comandos do Vensim estão dispostos em quatro barras de ferramantas, mais o menu inicial. O programa mostra-se de fácil utilização. Na Figura 9 encontram-se descritas as funções de três barras de ferramentas, juntamente com a tela inicial do programa.

Figura 9 – Barras de ferramentas e Tela Inicial



Fonte: Vensim Version 7.2a

Na Figura 9 encontra-se as ferramentas essenciais para a utilização da DS. Com estas funções elabora-se os diagramas DLC e DEF. Também encontra-se as ferramentas para análise do modelo proposto, atráves de gráficos e tabelas. Sera apresentado a seguir a barra de ferramenta para simulação e o menu inicial.

Na Figura 10 apresenta-se o menu do Vensim. Muitas operações no Vensim podem ser executadas por esta barra.

Figura 10 – Menu do Vensim

File Edit View Layout Model Options Windows Help

Fonte: Vensim Version 7.2a

File: contém funções comuns, como abrir modelo, Salvar, Imprimir etc;

Edit: permite copiar e colar partes selecionadas do seu modelo, também pode procurar por uma variável em seu modelo;

View: opções para manipular o esboço do modelo e para visualizar um modelo como somente texto.(disponível apenas no Vensim Professional e DSS);

Layout: permite manipular a posição e o tamanho dos elementos no esboço.(não acessível na versão estudante);

Model: acessa-se aos diálogos controle de simulação e limite de tempo, aos recursos de verificação de modelo e à importação e exportação de conjuntos de dados;

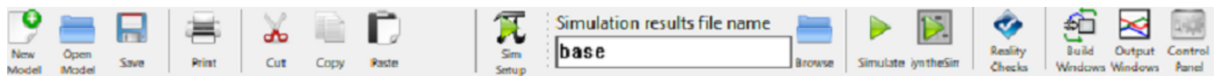
Tools: define-se as opções globais do Vensim e permite manipular ferramentas de análise e ferramentas de esboço, além de definir opções globais;

Windows: alterna-se diferentes janelas abertas;

Help: obtém-se acesso ao sistema de ajuda on-line.

Na Figura 11 observa-se a barra de ferramenta com as funções de edição e simulação do modelo.

Figura 11 – Simulação e Edição do modelo



Fonte: Vensim Version 7.2a

New Model: gera-se modelos novos;

Open Model: abri-se modelos já existentes;

Save: arquiva-se modelos desenvolvidos;

Print: habilita-se a impressão de dados e modelo;

Cut: corta-se componentes selecionados do modelo;

Copy: copia-se componentes selecionados do modelo;

Paste: cola-se componentes selecionados do modelo.

Sim Setup: configura-se uma simulação, depois de clicar em Sim Setup, realiza-se alterações nas variáveis auxiliares e constantes, diretamente na estrutura do modelo;

Simulation results file name: nomeia-se a simulação que será executada. Toda vez que há simulação do modelo os resultados são registrados. Realiza-se comparações entre simulações na mesma janela ao renomear a simulação;

Browse: seleciona-se uma execução existente para substituir ou cria-se uma nova;

Simulate: inicia-se a simulação do modelo. Se o nome da simulação especificado existir, subescreve-se a simulação existente ou cria-se nova;

Synthesim: inicia-se a simulação do modelo modo Synthesim. Um controle deslizante aparecerá ao lado de cada variável, conforme move-se o controle deslizante, o modelo será simulado e os novos resultados serão exibidos automaticamente;

Reality Checks: permite-se simulações lógicas nas variáveis do modelo;

Build Windows: torna-se visível a estrutura do modelo;

Output Windows: exibe-se janelas de saída (gráficos, tabelas, documentação) da variável selecionada;

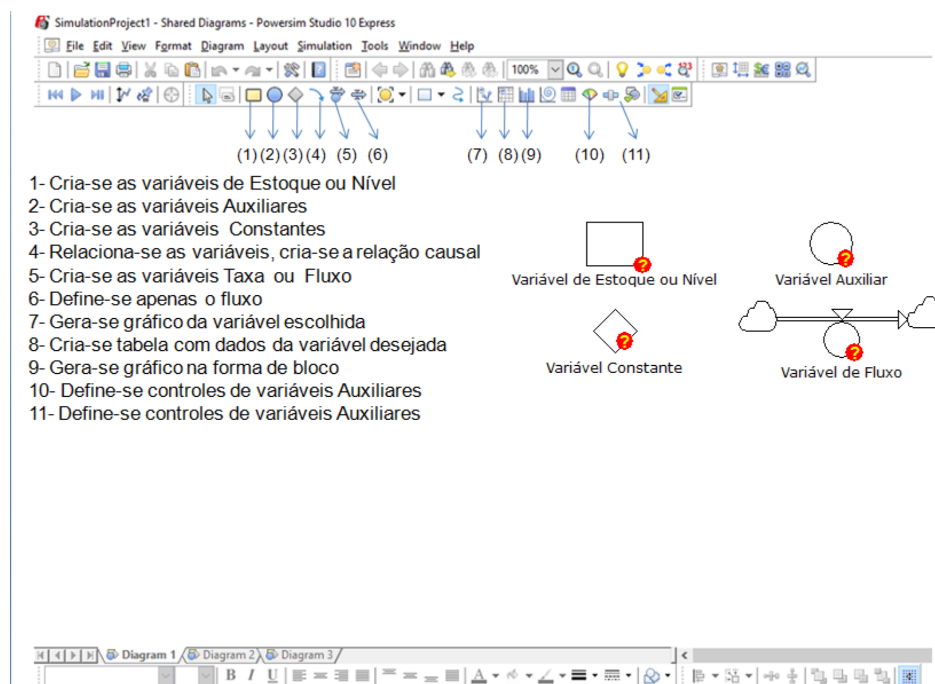
Control Painel: cria-se painel de controle para gráficos diferenciados.

Demostra-se a utilização das funções apresentas nesta sessão ao desenvolver os modelos no Capítulo 4.

3.2.2 Programa Powersim

O programa Powersim Studio desenvolvido pela empresa *Powersim Software AS*, segundo Powersim (2017), dispõem-se de uma interface acessível para elaboração e simulação de modelos aplicados a DS. As variáveis do modelo são descritas por formas geometricas diferentes do programa Vensim, contudo a interface de edição é semelhante. Utiliza-se, neste trabalho, a versão 10 do Powersim. Na Figura 12 observa-se as principais ferramentas e variáveis do Powersim.

Figura 12 – Barras de ferramentas e Tela Inicial



Fonte: Powersim (2018)

4 Modelo para Aplicação da DS

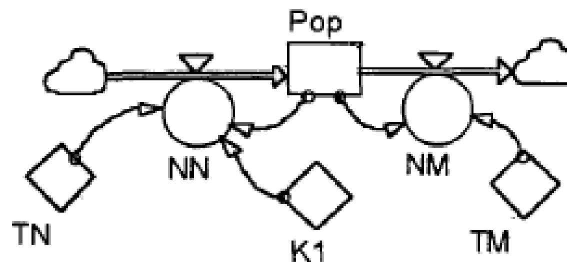
Nas próximas seções utiliza-se os 8 passos descritos no *Capítulo 3* para construção e validação. Assim como a utilização dos programas Vensim e Powersim para simulações e análise.

4.1 Projeção do Crescimento Populacional

4.1.1 Aquisição de Conhecimentos sobre o sistema

Inicia-se pela *Aquisição de Conhecimentos sobre o sistema* como descrito anteriormente. Utiliza-se um modelo simplificado da *Projeção de Crescimento Populacional* para fins de projeção de demanda de energia. O modelo da Projeção apresenta-se na Figura 13.

Figura 13 – Projeção de Crescimento Populacional



Fonte: Bordin (2000)

De acordo com Bordin (2000) o modelo constitui-se da variável de estoque População *(Pop)*, está variável ao longo do tempo aumenta com fluxo de nascimentos de pessoas *(NN)* e diminui com o fluxo que as pessoas morrem *(NM)*. Estes fluxos comportam-se conforme as taxas de natalidade *(TN)* e mortalidade *(TM)* constantes ao longo do tempo. Pode-se alterar estas variáveis durante as simulações. Ainda usa-se o coeficiente de ajuste da população *(K1)* para modificar comportamento do modelo, esta variável simboliza politícas públicas de controle de natalidade e campanhas de saúde.

4.1.2 Modo de Referência

Pela simplificação do modelo proposto na Figura 13, a variável de estoque situa-se como a variável de maior importância do modelo. Então, define-se o modelo de referência variando a População ao longo do tempo. Para a contrução do gráfico de referência da

projeção de crescimento populacional usa-se dados retirados do IBGE (2018), utiliza-se dados de 2010 à 2060. Observa-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Projeção da População no Brasil de 2010 à 2060

Ano	População total	Nascimentos	Óbitos	Taxa Bruta de Natalidade	Taxa Bruta de Mortalidade	Ano	População total	Nascimentos	Óbitos	Taxa Bruta de Natalidade	Taxa Bruta de Mortalidade
2010	**194890682**	**2939435**	**1240083**	**15.08**	**6.36**						
2011	196603732	2974525	1247751	15.13	6.35	2036	229847832	2534413	1891832	11.03	8.23
2012	198314934	2953890	1258235	14.89	6.34	2037	230459062	2513030	1933167	10.9	8.39
2013	200004188	2953178	1270306	14.77	6.35	2038	231007871	2493021	1975283	10.79	8.55
2014	201717541	3028202	1284346	15.01	6.37	2039	231494650	2473758	2017958	10.69	8.72
2015	203475683	3070979	1299541	15.09	6.39	**2040**	**231919922**	**2455519**	**2060782**	**10.59**	**8.89**
2016	205156587	2901053	1314164	14.14	6.41	2041	232284233	2437785	2103915	10.49	9.06
2017	206804741	3020743	1330811	14.61	6.44	2042	232588580	2422219	2147419	10.41	9.23
2018	208494900	3003585	1349693	14.41	6.47	2043	232834065	2407325	2191168	10.34	9.41
2019	210147125	2984414	1368954	14.2	6.51	2044	233020996	2392409	2234730	10.27	9.59
2020	**211755692**	**2963516**	**1389144**	**13.99**	**6.56**	2045	233149625	2377677	2278119	10.2	9.77
2021	213317639	2940629	1410602	13.79	6.61	2046	233220257	2363150	2321466	10.13	9.95
2022	214828540	2913688	1433605	13.56	6.67	2047	233233670	2349527	2364398	10.07	10.14
2023	216284269	2885501	1458023	13.34	6.74	2048	233190482	2335541	2407046	10.02	10.32
2024	217684462	2856690	1483777	13.12	6.82	2049	233090464	2320604	2449148	9.96	10.51
2025	219029093	2827039	1510693	12.91	6.9	**2050**	**232933276**	**2304717**	**2490559**	**9.89**	**10.69**
2026	220316530	2797674	1539159	12.7	6.99	2051	232719169	2288973	2531362	9.84	10.88
2027	221545234	2768000	1569117	12.49	7.08	2052	232448867	2273127	2571362	9.78	11.06
2028	222713669	2738355	1600375	12.3	7.19	2053	232122448	2255972	2610595	9.72	11.25
2029	223821305	2710134	1632845	12.11	7.3	2054	231739632	2237804	2648830	9.66	11.43
2030	**224868462**	**2683440**	**1666427**	**11.93**	**7.41**	2055	231300323	2218450	2686056	9.59	11.61
2031	225854415	2655850	1700970	11.76	7.53	2056	230805223	2199622	2722232	9.53	11.79
2032	226777802	2628742	1736861	11.59	7.66	2057	230255685	2180831	2757317	9.47	11.98
2033	227638581	2603540	1773877	11.44	7.79	2058	229652286	2161015	2791329	9.41	12.15
2034	228437122	2579544	1812136	11.29	7.93	2059	228995541	2141033	2824224	9.35	12.33
2035	229173685	2557147	1851454	11.16	8.08	**2060**	**228286347**	**2120842**	**2856059**	**9.29**	**12.51**

Fonte: IBGE (2018)

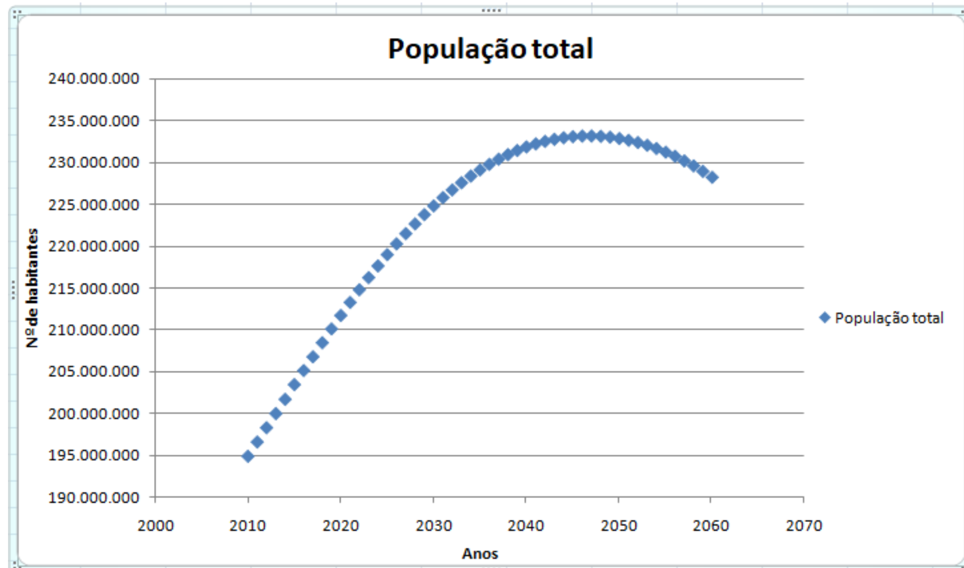
Na Tabela 1 encontra-se as taxas brutas de natalidade *(TN)*, leva-se em consideração todos os nascimentos independente do tempo de vida do indivíduo, e a taxa de mortalidade *(TM)*. Calcula-se estas taxas num determinado período, no presente trabalho o periodo é anual como pode ser visto na Tabela 1. Calcula-se as taxas conforme as seguintes equações:

$$TN = \frac{N\acute{u}merodeNascimentos}{Popula\c{c}\tilde{a}oTotal} * 1000 \tag{1}$$

$$TM = \frac{N\acute{u}merode\acute{O}bitos}{Popula\c{c}\tilde{a}oTotal} * 1000 \tag{2}$$

O modo de referência utilizando os dados da Tabela 1 encontra-se na Figura 14.

Figura 14 – Crescimento Populacional - Modo de Referência



Fonte: o autor

Com o modo de referência construido segue-se para os próximos passos. Inicia-se a construção do modelo utilizando o programa Vensim posteriormente faz-se uso do programa Powersim.

4.2 Programa Vensim

4.2.1 Construção do DLC

No terceiro passo busca-se analisar qualitativamente o modelo atráves do DLC. De acordo com o discutido na seção *seção 2.2.3.1* aumenta-se a população com o número de nascimentos e diminui-se com o número de mortos.

Inicia-se o processo para a construção do DLC. Primeiramente deve-se encontrar o software no local salvo e clica-se sobre o icone do Vensim. Seleciona-se **File** que encontra-se na barra menu Figura 10, em seguida clica-se em **New Model**, abre-se a janela **Model Settings** para configurar o limite de tempo da simulação do modelo. Não há necessidade de limite de tempo para os DLCs, clica-se diretamente em **Ok**, aceitando os valores padrões do software.(VENSIM, 2017).

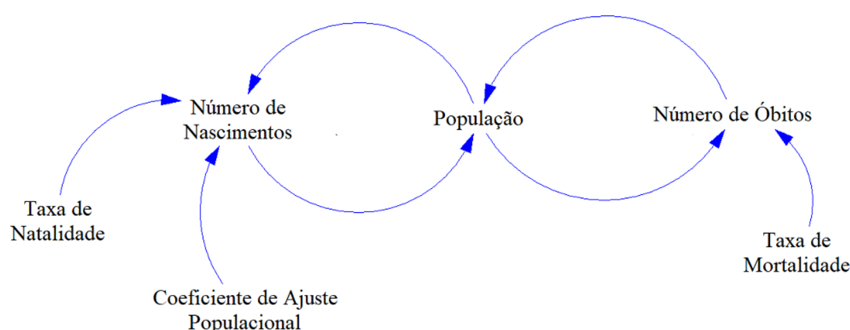
Observa-se que todos os modelos desenvolvidos no Vensim possuem limite de tempo, mesmo não os utilizando. Salva-se o modelo ao clicar em **Save** que encontra-se na tela inicial.

Cria-se as variáveis do DLC ao clicar na ferramenta **Variable** , em seguida clica-se na área de trabalho. Automaticamente abre-se uma caixa texto, onde é possível nomear a variável. Escreve-se *Número de Nascimentos* na caixa texto e pressiona-se **Enter** no teclado do computador. Para Criar mais variáveis apenas clica-se na área de trabalho e segue-se o restante do procedimento. Cria-se ainda as variáveis *População*, *Número de Óbitos*, *Taxa de Natalidade*, *Taxa de Mortalidade* e *Coeficiente de Ajuste Populacional*. Observa-se que o software Vensim possibilita a criação de diversas variáveis sem necessitar clicar na ferramenta **Variable** novamente, agilizando o processo de montagem do modelo.

Para mover elementos do modelo, seleciona-se a ferramenta **Move/Size** e clica-se sobre a variável desejada, a mesma ficará em negrito, pressiona-se o botão esquerdo do mouse, ou notebook, e move-se o cursor para ajustar a posição desejada.

Após criar as variáveis do modelo, deve-se realizar as relações causais, relações de causa e efeito entre as variáveis, para isto seleciona-se a ferramenta **Arrow** . Após ferramenta selecionada clica-se na variável *Número de Nascimentos* e *População*, percebe-se uma seta indicando a relação entre as duas variáveis. Nota-se um pequeno círculo no meio da seta, este serve para redimensionar ou mover a seta. Com as ferramentas ou selecionadas mais o botão esquerdo do mouse presionado, ao mover o mouse ou o cursor do teclado realiza-se as alterações necessário. Deve-se seguir os passos acima para as outras variáveis. Ao final desses procedimentos deve-se obter o seguinte modelo, Figura 15.

Figura 15 – Relações Causais do DLC



Fonte: o autor

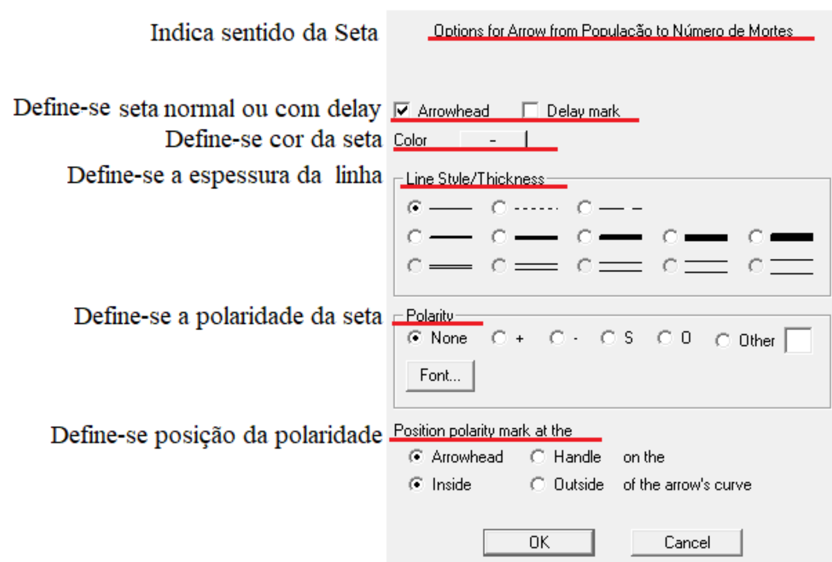
Agora deve-se indicar as relações causa e efeito entre as variáveis do sistema, *(+)* para ligação causal de reforço e *(-)* para ligação causal de equílibrio e indentificar os laços

de realimentação do sistema. Para estas deduções utiliza-se a teoria desenvolvida na *seção 2.2.3.1*

Utiliza-se as polaridade das setas para indicar as relações causa e efeito. Para adicionar sinais e outras configurações nas setas seleciona-se as ferramentas **Move/Size**  ou **Arrow** .

Identifica-se a seta desejada e clica-se com o botão direito do mouse no pequeno círculo no meio da seta. Ao realizar esta ação, abre-se a janela para configuração, Figura 16.

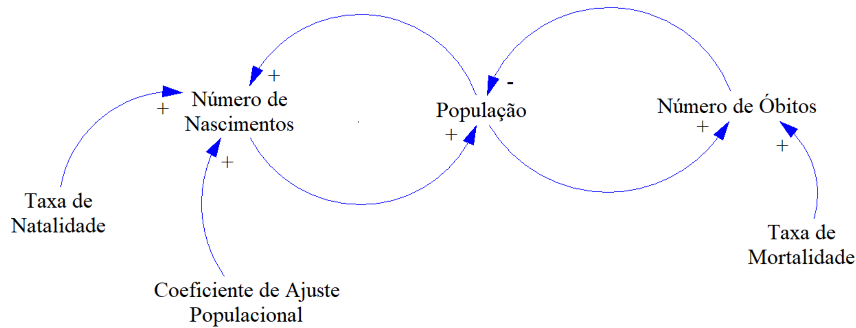
Figura 16 – Janela de Configuração das Setas



Fonte: o autor

Para o exemplo proposto mantém-se as configurações padrões, apenas modifica-se as polaridades. O processo descrito acima é individual, deve-se configurar uma seta por vez. Ao final desses procedimentos deve-se obter o seguinte modelo, Figura 17.

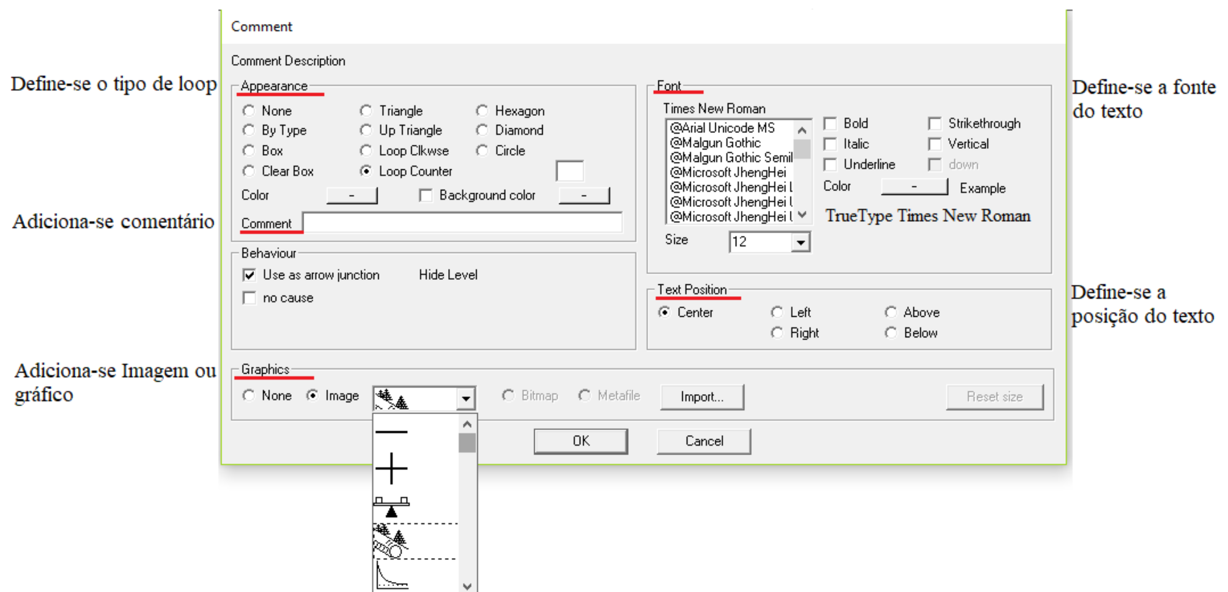
Figura 17 – Relações Causais do DLC polarizadas



Fonte: o autor

Através da análise do sistema identifica-se 2 laços de realimentação, um de reforço e outro de equilíbrio como visto no *seção 2.2.3.1*. Para representar os laços de realimentação no DLC, seleciona-se a ferramenta **Comment** e clica-se no meio de qualquer um dos laços de realimentação. Ao realizar esta ação, abre-se a janela, **Comment**, Figura 18.

Figura 18 – Janela de Configuração dos Comentários

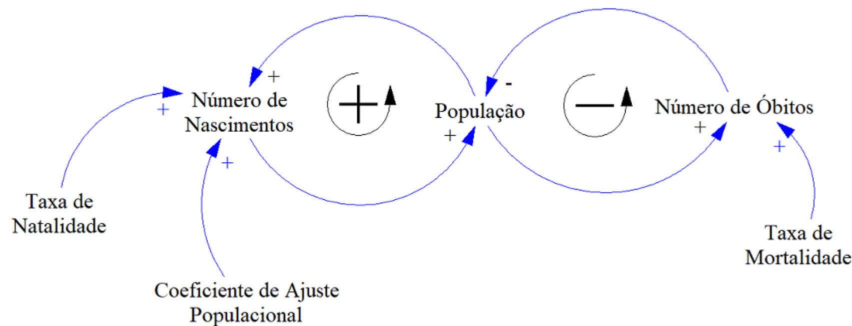


Fonte: o autor

O laço de realimentação formado pelas variáveis *Número de Nascimentos* e *População* tem sinal *(+)* e o laço de realimentação formado pelas variáveis *População* e *Número de Mortes* tem sinal *(-)*, conforme convenção descrita na *seção 2.2.3.1*. Seleciona-se na janela de configuração *Loop Counter*, *Image* mais o sinal *(+)* e *Center*, após clica-se em

Ok. Repete-se os mesmos passos para o laço seguinte alterando o sinal para *(-)*. Ao final desses procedimentos deve-se obter o modelo final do DLC, Figura 19.

Figura 19 – Diagrama DLC Completo



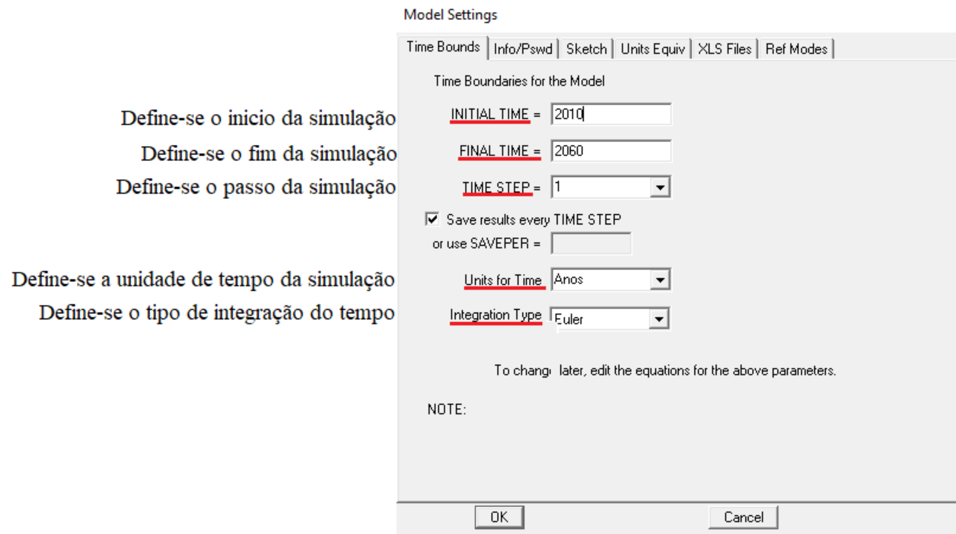
Fonte: o autor

Caso haja necessidade de deletar algum componente do modelo, seleciona-se a ferramenta **Delete** e clica-se com o botão esquerdo do mouse sobre o componente que deseja-se deletar.

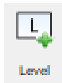
4.2.2 Construção do DEF

No quarto passo busca-se quantificar a análise do sistema, inicia-se o processo de construção do DEF. Seleciona-se **File** que encontra-se na barra menu Figura 10, em seguida clica-se em **New Model**, abre-se a janela **Model Settings** para configurar o limite de tempo da simulação do modelo, Figura 20.

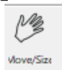
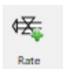
Figura 20 – Configuração do Limite de Tempo da Simulação DEF



Fonte: o autor

Diferentemente do DLC, no DEF é necessário configurar o limite de tempo. Em *INITIAL TIME* coloca-se 2010, *FINAL TIME* coloca-se 2060, *TIME STEP* coloca-se 1, em *Units for time* coloca-se Anos e *Integracion Type* mantém-se o padrão do software *Euler*. Em seguida clica-se em **Ok**. A configuração esta ilustrada na Figura 20. Salva-se o modelo ao clicar em **Save** .

Os valores definidos acima serão utilizados para realizar a simulação.

Inicia-se o DEF pela variável de estoque *População*. Seleciona-se a ferramenta **Level**  em seguida clica-se na área de trabalho. Automaticamente abre-se uma caixa texto onde é possível nomear a variável, escreve-se *População* na caixa texto e pressiona-se **Enter** no teclado do computador. Para dimencionar elementos do modelo seleciona-se a ferramenta **Move/Size**  e pressiona-se o botão direito do mouse sobre o pequeno círculo que aparece na extremidade do retângulo que envolve a variável, move-se o cursor para dimensionar aumentando ou diminuindo o retângulo.

Cria-se agora as variáveis de fluxo *Nascimento* e *Óbitos*. Seleciona-se a ferramenta *Rate* em seguida clica-se na área de trabalho, ira aparecer uma nuvem com uma seta, direciona-se a seta até *População* e clica-se sobre a variável. Automaticamente abre-se uma caixa texto onde nomea-se a variável de fluxo, escreve-se *Nascimento* e pressiona-se **Enter** no teclado do computador. Em seguida clica-se na variável *População* e na área

de trabalho. Também abre-se uma caixa texto onde nomea-se a outra variável de fluxo, escreve-se *Óbitos* e pressiona-se **Enter** no teclado do computador. Deve-se observar que as variáveis estoque ligam-se somente as variáveis de fluxo.

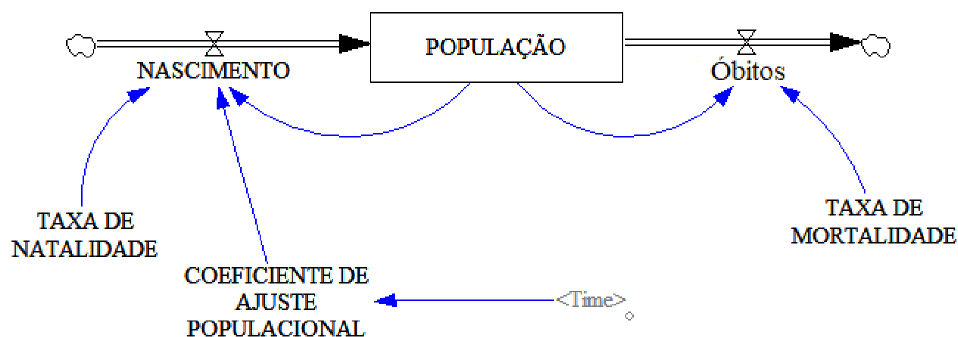
Cria-se agora as variáveis auxiliares, *Taxa de Natalidade*, *Taxa de Mortalidade* e *coeficiente de ajuste da população*. Seleciona-se a ferramenta **Variable** em seguida clica-se na área de trabalho. Automaticamente abre-se uma caixa texto onde nomea-se a variável auxiliar, escreve-se *Taxa de Natalidade* na caixa texto e pressiona-se **Enter** no teclado do computador. Posteriormente procede-se da mesma forma para criar a variável *Taxa de Mortalidade* e *coeficiente de ajuste da população*.

Aproxima-se as variáveis *Taxa de Natalidade* e *Taxa de Mortalidade* das variáveis de fluxo *Nascimento* e *Óbitos* respectivamente. Então seleciona-se a ferramenta **Move/Size** e clica-se sobre a variável desejada, fica-se em negrito a variável. Pressiona-se o botão esquerdo do mouse, ou notebook, e move-se o cursor para ajustar a posição.

Em seguida cria-se as relações causais. Segue-se o modelo visto na Figura 18. Para isto seleciona-se a ferramenta **Arrow** e efetua-se as ligações entre as variáveis, conforme visto no diagrama DLC.

Seleciona-se a ferramenta **shadow** e clica-se na área de trabalho. Automaticamente abre-se a janela **Variable to add to sketch** seleciona-se o item **Time**. Liga-se **Time** ao *coeficiente de ajuste da população* com auxilio de **Arrow** e efetua-se a ligação entre as variáveis. Ao final desses procedimentos deve-se obter o seguinte modelo DEF, Figura 21.

Figura 21 – Diagrama DEF Completo - Vensim



Fonte: o autor

Na Figura 21 observa-se o modelo final do DEF, o próximo passo é equacionar as variáveis para realizar análises e simulações do modelo. Para realizar o equacionamento do DEF retirou-se dados da Tabela 1.

O equacionamento inicia-se pela variável de estoque, onde são acumulados os valores das variáveis de fluxo. A variável *População* é regida pela seguinte Equação 3.

$$Pop(t) = pop(t-1) + \int_0^t [NN(t) - NM(t)]\, dt \tag{3}$$

Onde:

Pop: número de habitantes no periodo t (hab.milhões).

Pop(t-1): número de habitantes no periodo t-1 (hab.milhões).

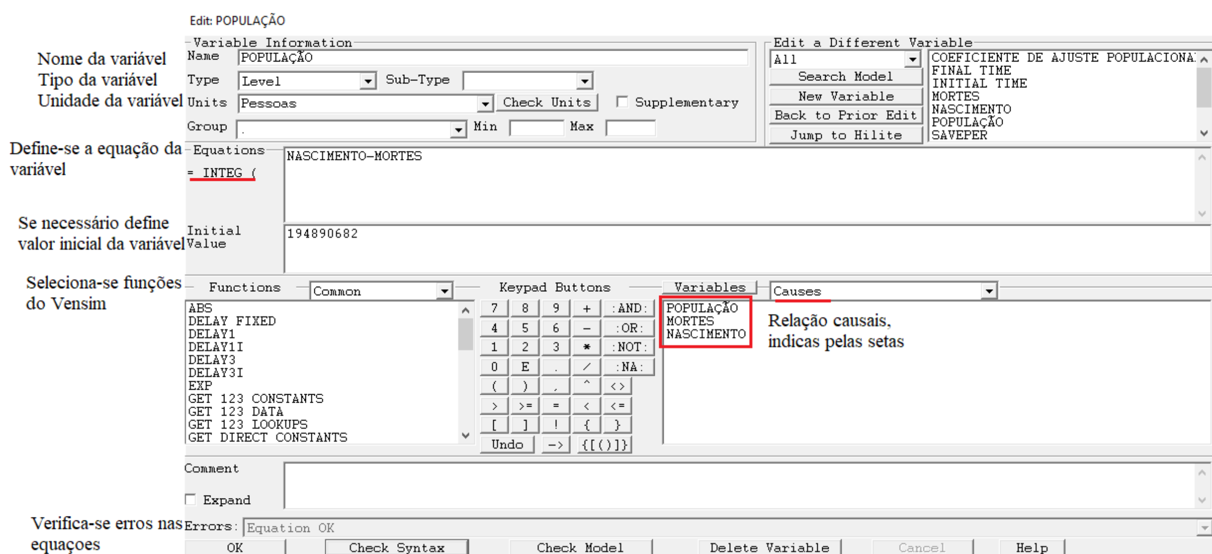
NN: número de nascimentos periodo t (hab/ano).

NM: número de mortes periodo t (hab/ano).

Uma caracteristica importante da variável de estoque pode ser identificada pela Equação 3. Mesmo que as variáveis de fluxos se anulem ou tenha o valor de zero, a variável de estoque **nunca** é zerada.

Para equacionar a variável *População* seleciona-se a ferramenta **Equations** nota-se que as variáveis a serem equacionados estarão em negrito. Clica-se na variável *População* automaticamente abre-se a janela para realizar o equacionamento. O equacionamento da variável encontra-se na Figura 22.

Figura 22 – Equacionamento da variável de Estoque



Fonte: o autor

Observa-se na Figura 22 que algumas lacunas da variável selecionada encontram-se preenchidas, como *Nome*, *Type* e *Equatios*. No campo *Variable* mostra-se as relações causais da variável. Ocorre-se essa pré-configuração devido a maneira que desenvolveu-se o modelo. Percebe-se que no campo *Equations* a palavra *INTEG* representa a integração descrita na Equação 3.

Deve-se selecionar a unidade da variável, escreve-se *pessoas* na opção *Units*, e adiciona-se o valor inicial da variável de estoque obtido da Tabela 1, no caso o a população de 2010. Verifica-se a veracidade da equação clicando em **Check Syntax**, caso não houver erro, clica-se em **Ok** caso contrário aparecerá uma mensagem de erro e deve-se corrigir a equação.

Nota-se ao voltar para interface de trabalho qua a variável *População* não esta em negrito. Caso houvesse erro no equacionamento, a variável permeceria em negrito.

Agora equaciona-se a variável de fluxo *Nascimento*, a mesma é regida pela seguinte Equação 4.

$$NN(t) = pop * TN * K1 \tag{4}$$

NN: número de nascimentos (hab./ano)

Pop: número de habitantes (hab.milhões)

TN: taxa de natalidade (%a.a.)

K1: coeficiente de ajuste da população (adimensional)

Clica-se na variável *Nascimento* e abre-se a janela para realizar o equacionamento. O equacionamento esta representado na Figura 23.

Figura 23 – Equacionamento da variável de fluxo Nascimento

Fonte: o autor

Percebe-se que mais uma vez, algumas lacunas da variável selecionada encontram-se preenchidas, como *Nome* e *Type*. No campo *Variable* mostra-se as relações causais da variável. Altera-se o tipo da variável para auxiliar. Deve-se selecionar a unidade da variável, escreve-se *"pessoas/ano"* na opção *Units*. Mas diferentemente da variável de estoque, agora escreve-se a equação. Utiliza-se o mouse e o teclado virtual para desenvolver a equação. Clica-se na variável no campo *Variable* e adiciona-se o operador pelo teclado virtual. O equacionamento asemelha-se a equação *4.4*. Verifica-se a veracidade da equação clicando em **Check Syntax**, caso não houver erro, clica-se em **Ok**, caso contrário aparecerá uma mensagem de erro e deve-se corrigir a equação,

Em seguida equaciona-se a variável de fluxo *Óbitos*, a mesma é regida pela seguinte Equação 5.

$$NM(t) = pop * TM \tag{5}$$

Onde:

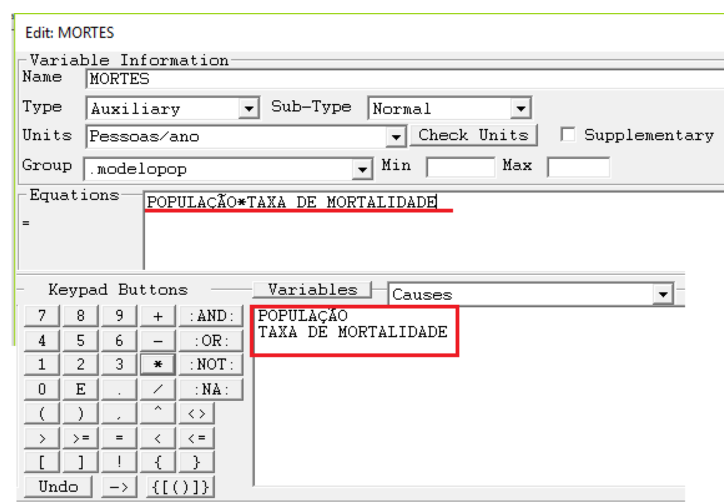
NM: número de óbitos (hab./ano)

Pop: número de habitantes (hab.milhões)

TM: taxa de mortalidade (%a.a.)

Clica-se na variável *Mortes* e segue-se o mesmo processo descrito acima. A configuração esta representada na Figura 24.

Figura 24 – Equacionamento da variável de fluxo Óbitos



Fonte: o autor

Para equacionar as variáveis auxiliares *Taxa de Natalidade* e *Taxa de Mortalidade*, segue-se o mesmo procedimento descrito para as variáveis de fluxo. Nota-se que as variáveis auxiliares, nesse caso, são do tipo constantes. Deve-se também selecionar a unidade da variável, em *Units* seleciona-se *Dmnl*.

Clica-se sobre a variável *Taxa de Natalidade* e abre-se a janela de equacionamento. O valor da constante é extraido da Tabela 1, taxa bruta de natalidade de 2010, utiliza-se o teclado virtual para adicionar valor. Verifica-se a veracidade da equação clicando em **Check Syntax**, em seguida clica-se em **Ok**. A equacionamento encontra-se na Figura 25.

Figura 25 – Equacionamento da taxa de Natalidade

Fonte: o autor

Utiliza-se o mesmo procedimento para equacionar a *Taxa de Mortalidade*. Busca-se o valor da constante na Tabela 1, taxa bruta de mortalidade de 2010.

Utiliza-se uma função especial do Vensim para o equacionamento da variável auxiliar *coeficiente de ajuste da população*.Isso deve-se ao fato que a variável altera-se no tempo, possuindo n valores. Então para representar o *coeficiente de ajuste da população* ao longo do tempo, deve-se criar n variáveis. Isto torna-se inviável dependendo da duração do tempo do modelo executado. Por esse motivo utiliza-se a função *Lookup*. Com esta função cria-se apenas uma variável variando com n valores ao longo do tempo. Utiliza-se o *Lookup* com alguma variável do tipo *Shadow Variable*, no exemplo proposto, é utilizado à variável *Time*.

Clica-se sobre a variável *coeficiente de ajuste da população* e abre-se a janela de equacionamento. Primeiro seleciona-se o tipo da variável em *Type*, marca-se *Lookup*, em seguida clica-se em *as Graph*, Figura 26.

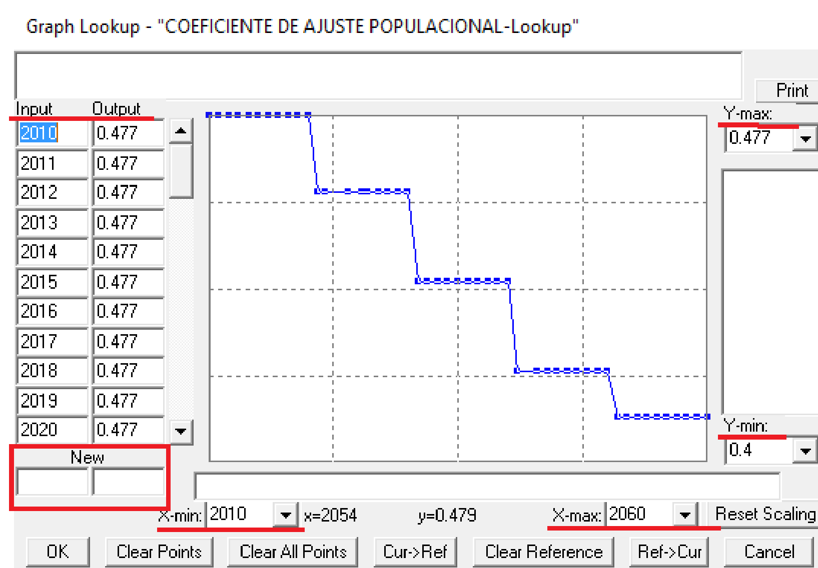
Figura 26 – Configuração do Lookup

Edit: COEFICIENTE DE AJUSTE POPULACIONAL
Variable Information
Name COEFICIENTE DE AJUSTE POPULACIONAL
Type Lookup Sub-Type As Graph
Units Check Units Supplementary
Group .modelopop Min Max

Fonte: o autor

Pode-se construír o *Lookup* como uma tabela de números no Equation Editor ou como um gráfico no Graph Lookup Editor. Utiliza-se o Graph Lookup Editor pela facilidade e agilidade do processo. Ao clicar em *as Graph* abre-se a janela de configuração, Figura 26. Pega-se os dados de 2010 a 2060 da Tabela 1 para a simulação do modelo, então a função *Lookup* limita-se em X de X-min=2010 à X-max=2060. Percebe-se na Tabela 1 que a Taxa de Natalidade Bruta diminui ao longo do tempo. Para definir os valores limites de Y, ajustou-se o modelo para o periodo de 2010 à 2020 mantendo a variável *coeficiente de ajuste da população* constante. Após estendeu-se o periodo até 2060 ajustando os valores da *coeficiente de ajuste da população* a cada 10 anos. Então a função *Lookup* limita-se em Y de Y-min=0.4 à Y-max=0.477.

Figura 27 – Função Lookup



Fonte: o autor

Após definir os limites da função *Lookup*, escreve-se em *Input* os valores de X (2010 à 2060) e em *Output* os valores Y (0.477, 0.46, 0.44, 0.42, 0.41 a cada 10 anos). Deve-se

adicionar ponto a ponto na janela *New*. Conforme adiciona-se os pontos o gráfico da função forma-se. Pode-se modificar a posição dos pontos clicando diretamente na janela do gráfico. Após adição dos pontos, clica-se em **Ok** e visualiza-se a janela de equacionamento. Identica-se algumas alterações nos campos da janela de equacionamento Figura 28.

Figura 28 – Janela Equacionamento do Lookup

Fonte: o autor

Nota-se que os campos *Equations* e *Name* encontram-se configurados com o Lookup, e adiciona-se o campo *Sub-Type*. Deixa-se em branco o campo *Units*, a variável *coeficiente de ajuste da população* é adimensional. Verifica-se a veracidade da equação clicando em **Check Syntax** em seguida clica-se em **Ok**. Todas as variáveis do modelo encontram-se equacionadas.

Na proxima sessão apresenta-se as ferramantes de simulação e análise disponíveis no programa.

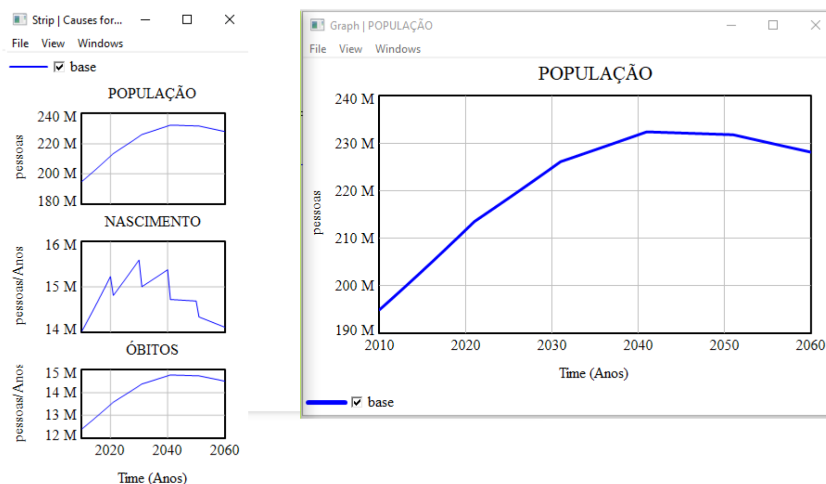
4.2.3 Simulações

Utiliza-se as ferramentas de simulação para vizualizar os efeitos das interações sobre as variáveis do modelo ao longo do tempo, nesta etapa faz-se uso dos programas expostas no *Capítulo 3*.

Uma boa maneira para iniciar a análise do modelo proposto é analisar o comportamentos das variáveis através de gráficos. Para utilizar este artifício, clica-se em **Simulate** , automaticamente abre-se uma janela com a opção de salvar o arquivo de simulação existente ou opta-se por criar um novo arquivo. Lembre-se que toda vez que simula-se o modelo os resultados são registrados, e possibilita-se de realizar comparações entre as simulações na mesma janela ao renomear a simulação no campo **Simulation results file name** que encontra-se na tela inicial.

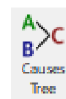
Para gerar-se os gráficos clica-se na variável desejada, no exemplo proposto usa-se a variável População, a mesma ficara em negrito. Após clica-se em **Graph**  para vizualizar o somente o gráfico da variável escolhida, ou em **Causes Strip** para vizualizar a variável desejada e as variáveis que interagem com a mesma. Ainda há opção de vizualizar os dois gráficos ao mesmo tempo clicando em **Output Windows**. Na Figura 29 visualiza-se os resultados da operação.

Figura 29 – Gráficos da Variável População



Fonte: o autor

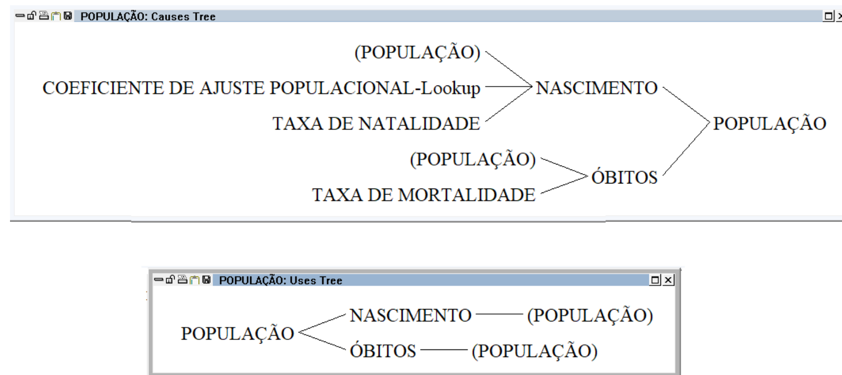
Nota-se na Figura 29 que as variáveis de fluxo *Nascimentos e Óbitos* são as variáveis que interagem com a variável estoque *População* e encontram-se de acordo com a construção do modelo. Configura-se as legendas dos gráficos no momento que cria-se o modelo DEF como é mostrado em seções anteriores. Nomeou-se a simulação como *base* como pode ser visualizado na Figura 29. Nos passos a seguir altera-se o nome da simulação para realizar comparações.

Outra ferramenta interressante do Vensim são as representações gráficas, tipo árvore, onde demostra-se as relações causa e efeito das variáveis selecionada. Utiliza-se estas ferramentas ao clicar em **Causes Tree**  onde vizualiza-se as variáveis que tem influências causais na variáveis selecionada e para vizualizar os efeitos que a variável

selecionada gera, clica-se em **Uses Tree** 

. Na Figura 30 encontram-se a representação gráficas tipo árvore da variável de estoque *População*.

Figura 30 – Relação de influência causa e efeito da variável População



Fonte: o autor

Analisando a Figura 30 reforça-se necessidade do conhecimento teórico da DS. Na parte superior há a função *Causes Tree*, onde mostra-se as variáveis que atuam sobre a variável população, na parte inferior na função *Uses Tree* mostra-se em quais variáveis a variável população atua.

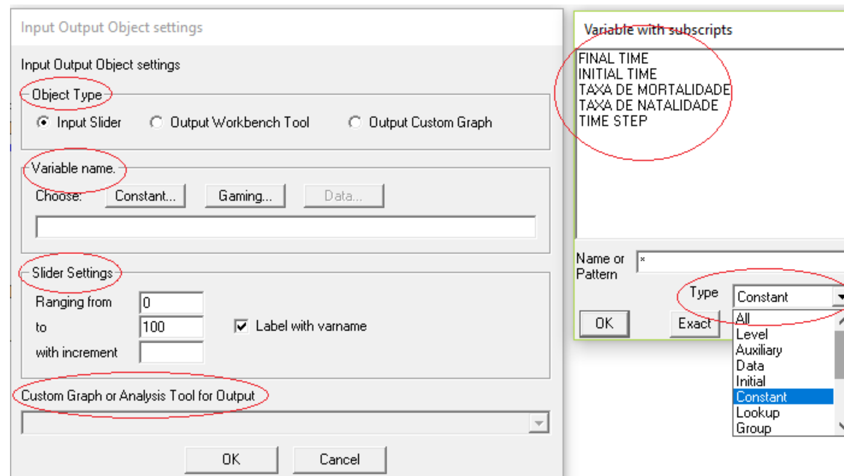
Estas representações assemelham-se ao DLC porém não há indicação da influência das variáveis com os sinais positivo ou negativo como é aplicado no DLC. Sem o conhecimento teórico o resultado dessas ferramentas de análise tornam-se vagos. Para modelos maiores esta ferramenta de análise torna-se útil.

A proposta do DEF é observar as variáveis em interação ao longo do tempo e quantificar os resultados. Para realizar as simulações observando e manipulando as variáves escolhidas, deve-se criar um controle para manipular as variáveis desejadas. Inicialmente muda-se de página para desenvolver o controle. Na view 1 encontra-se o modelo populacional para alterar para view 2 clica-se na **Seta** que encontra-se na parte inferior da tela inicial, obtêm-se então uma tela um branco.

Inicia-se o processo ao clicar em **IO Object** 

IO Object após clica-se na tela em branco. Abre-se uma janela de configuração, onde seleciona-se as variáveis que serão manipuladas e as que serão observadas. Na Figura 31 vizualiza-se a janela de configuração.

Figura 31 – Configuração dos Controles



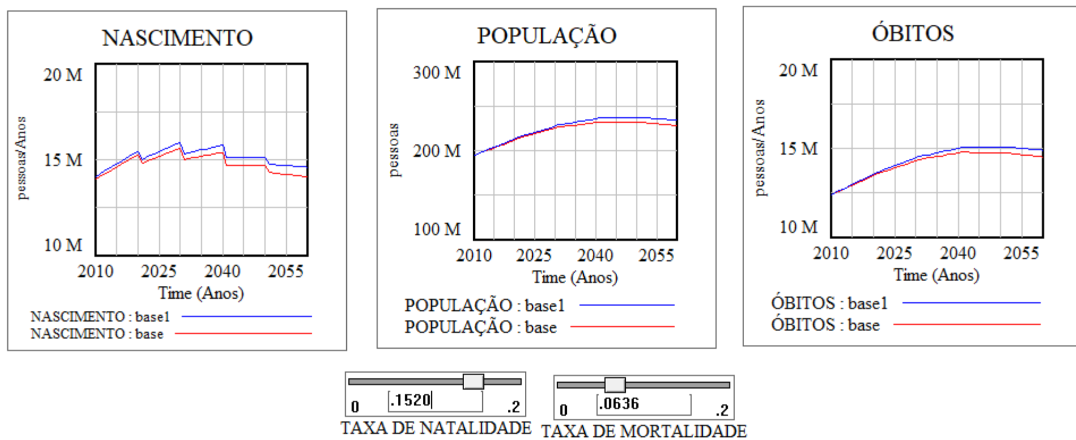
Fonte: o autor

Inicia-se este caso pelas variáveis de fluxo *Nascimento e Óbitos*, e a variável de estoque *População*, as quais serão monitoradas. Na janela de configuração em **Object Type** seleciona-se textitOutput Workbench Tool, após em **Variable name** seleciona-se *Level*, abre-se uma janela **Variable with subscripts** onde seleciona-se a variável *População* após clica-se em OK. Depois em **Custom Graph on Analysis Tool for Output** clica-se na seta para baixo e selecioana-se *Graph*. Segue-se o mesmo procedimento para as outras duas variáveis de fluxo, porém em **Variable name** seleciona-se *Auxiliary*.

Cria-se agora os controles para isso utiliza-se as variáveis constantes *Taxa de Natalidade e Mortalidade*. Segue-se o procedimento inicial descrito acima, mas na janela de configuração em **Object Type** seleciona-se *Imput Slider*. Após em **Variable name** seleciona-se *Constant*, no momento abre-se uma janela **Variable with subscripts** e seleciona-se a variável *Taxa de Natalidade* e clica-se em **OK**. Usa-se o campo **Slider Settings** para dimensionar a excursão dos controles. Em *Ranging From* coloca-se o início da excursão do controle *0*, em *to* coloca-se o final *0.2*. Leva-se em consideração os valores da Taxa de Natalidade e Mortalidade, 15.08% e 6.36%, respectivamente. Extraiu-se os valores da tabela de Projeção da População no Brasil de 2010 à 2060 extraída do IBGE. No campo *with increment* aplica-se o passo da excursão, onde aplica-se o valor de *0.0001*.

Após seguir os passos acima descritos, clica-se em **Synthesim** . Aconselha-se salvar uma nova simulação, renomeando-a como Base1 por exemplo. Habilita-se com esta operação a manipulação das variáves constantes *Taxa de Natalidade e Mortalidade* utilizando os controles deslizantes. Na Figura 32 verifica-se a simulação.

Figura 32 – Controles e Gráficos



Fonte: o autor

Ao utilizar os dois controles deslizantes, visualiza-se a influência das variáveis de fluxo *Nascimento e Óbitos* e na variável de estoque *População* em tempo real. Nota-se na Figura 32 que há duas curvas plotadas, base1 em azul e a base em vermelho. A curva que sofre alteração atráves da variação dos controles é a base1 em azul, a curva base em vermelho permanece constante servindo para comparação. A cada simulação abre-se a opção de subescrever a simulação existente ou de salvar uma nova. A cada nova simulação cria-se uma nova curva no gráfico. Deve-se observar que há utilizar a ferramenta **Synthesim** o modelo se mantém bloqueado para qualquer outra ferramenta de análise. Necessita-se clicar em **Stop Setup** para encerrar a simulação

Além da análise gráfica das variáveis, é possível analisar os variáveis através de tabelas. Primeiro seleciona-se a variável desejada, continua-se com a variável de estoque *População*, Clica-se em **Table Time**. Automaticante abre-se uma tabela com os valores da simulação.

Figura 33 – Projeção do Crescimento Populacional - simulada

Table Time Down

Time (Anos)	"POPULAÇÃ	POPULAÇÃO	
2010	O" Runs:	1.94891e+08	1.94891e+08
2011	base1	1.96626e+08	1.96515e+08
2012	base	1.98377e+08	1.98152e+08
2013		2.00143e+08	1.99803e+08
2014		2.01926e+08	2.01468e+08
2015		2.03723e+08	2.03146e+08
2016		2.05537e+08	2.04839e+08
2017		2.07367e+08	2.06545e+08
2018		2.09214e+08	2.08266e+08
2019		2.11077e+08	2.10001e+08
2020		2.12956e+08	2.11751e+08
2021		2.14852e+08	2.13515e+08
2022		2.1621e+08	2.14747e+08
2023		2.17577e+08	2.15985e+08
2024		2.18952e+08	2.17231e+08
2025		2.20335e+08	2.18484e+08
2026		2.21728e+08	2.19744e+08
2027		2.23129e+08	2.21012e+08
2028		2.24539e+08	2.22287e+08
2029		2.25959e+08	2.23569e+08
2030		2.27387e+08	2.24858e+08
2031		2.28824e+08	2.26155e+08
2032		2.29574e+08	2.26778e+08
2033		2.30327e+08	2.27402e+08
2034		2.31083e+08	2.28028e+08
2035		2.31841e+08	2.28655e+08

Fonte: o autor

Através da Figura 33 gerada obtêm-se os dados das duas curvas simuladas anteriormente. Não há a opção de comparar os valores em tempo real como realizado nas simulações gráficas. Deve-se observar que há arredondamentos de valores na tabela. Com a versão free do software Vensim não há opção de exportar arquivos para o excel.

Com as ferramentas de simulação apresentas nessa seção segue-se para os próximos passos descritos no capítulo 4.

4.2.4 Estimativa dos Valores dos Parâmetros

No quinto passo estima-se os valores dos parâmetros do modelo. Para o modelo da Projeção do Crescimento Populacional extraiu-se dados reais obtidos do IBGE 2018. Os valores das variáveis encontram-se na Tabela 1. Pode-se atráves desses dados realizar a validação do modelo.

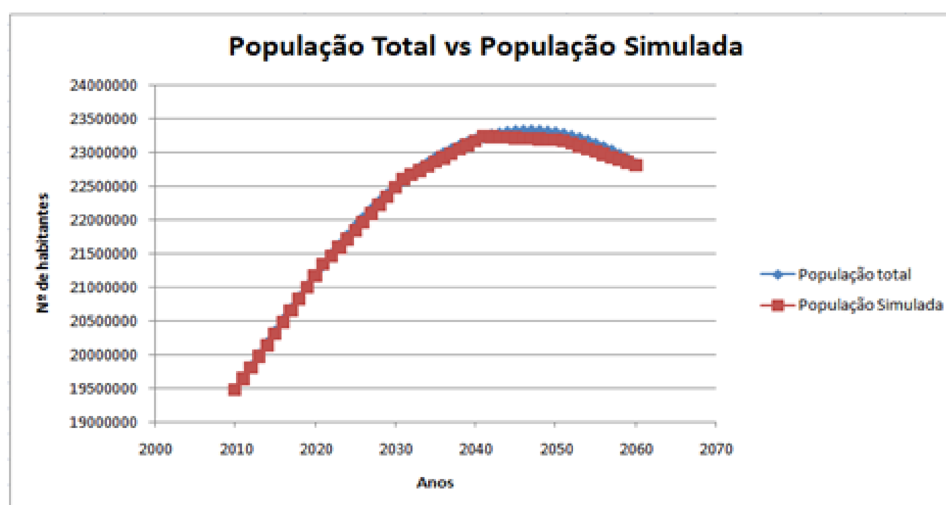
4.2.5 Verificação da Consistência

No sexto passo realiza-se a simulação do modelo DEF afim de comparar com o modo de referência, visando confirmar a consistência do modelo.

Faz-se uso das ferramentas descritas na *seção 4.2.3*. A variável de interrese novamente é a *População*. Neste caso especifico usa-se a função **Table Time** Table Time para obter os dados da projeção do crescimento populacional. De posse desses dados usa-se o excel

para gerar o gráfico do simulação. Na Figura 34 compara-se o População Total (modo de referência), Figura 14, com a População Simulada.

Figura 34 – Projeção da População Total vs População Simulada - Vensim



Fonte: o autor

Nota-se que o comportamento do modelo assemelha-se ao modo de referência. Além de verificar visualmente atráves de gráficos pode-se analisar os valores da simulação através de planilhas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Modo de População Total vs População Simulada - Vensim

Ano	População Total	População Simulada	Erro
2010	194890682	194891000	0, 0002%
2020	211755692	211751000	0, 0022%
2030	224868462	224858000	0, 0047%
2040	231919922	231819000	0, 0435%
2050	232933276	231905000	0, 4414%
2060	228286347	228173000	0, 0497%

Fonte: o autor

Realizou-se a análise da simulação com uma amostragem a cada dez anos. Identifica-se atráves da Tabela 2 a consistência do modelo, o mesmo apresenta um erro médio de **0,0903%** em comparação ao modo de referência. Vale ressaltar que no software Vensim ocorre arredondamentos na unidade de milhar dos valores.

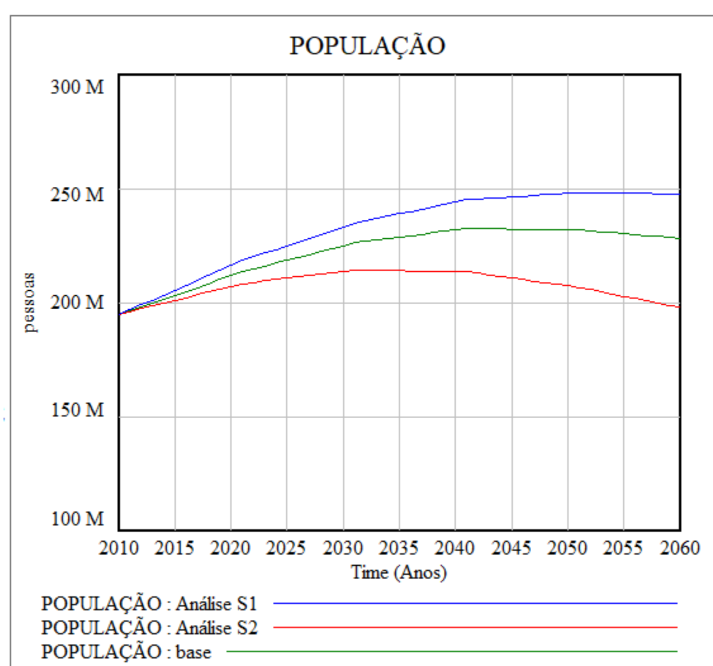
4.2.6 Análise de Sensibilidade

Pela simplicidade do modelo desenvolvido identifica-se que todas as variáveis apresentam relevância significativa no comportamento do modelo. Então, Realiza-se a análise de sensibilidade utilizando a variável auxiliar *coeficiente de ajuste da população.*

Altera-se os valores do *coeficiente de ajuste da população* em +10% *Análise S1* (Azul) e -10% *Análise S2* (Vermelho) de acordo como o valor referência *base* (Verde).

Para efetuar as alterações do *coeficiente de ajuste da população* precisa-se modificar a função *Lookup* como visto na *seção 4.2.2*. Para cada caso realiza-se a simulação do modelo. Para visualiar as simulações na forma de gráficos de cada valor alterado deve-se nomear cada simulação no campo *Simulation results file name* de acordo com apresentado na *seção 4.2.3*. O resultado da análise de sensibilidade encontra-se na Figura 35.

Figura 35 – Análise de Sensibilidade - Coeficiente de Ajuste da População



Fonte: o autor

Na Tabela 3 pode-se melhor analisar os resultados obtidos.

Tabela 3 – Análise de Sensibilidade - Coeficiente de Ajuse da População

Projeção de Crescimento Populacional (em milhões de habitantes)					
Coef. Pop	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
10%	216227000	233215000	244074000	247872000	247591000
Base	211751000	224485800	231819000	231905000	228173000
-10%	207048000	213522000	213601000	207323000	197907000

Impactos					
Coef. Pop	**2020**	**2030**	**2040**	**2050**	**2060**
-10%	2,714%	5,596%	8,401%	11,129%	13,778%
10%	1,900%	3,441%	5,009%	6,604%	8,226%

Fonte: o autor

Ao observar a Tabela 3 verifica-se os impactos ocorridos ao alterar *coeficiente de ajuste da população* no decorrer do tempo. Os resultados estão de acordo com o esperado, leva-se em consideração que *coeficiente de ajuste da população* está diretamente relacionado ao fluxo de nascimento e os dados obtidos do IBGE 2018 sobre a projeção do crescimento populacional onde observa-se o aumento da taxa de mortalidade e a diminuição da taxa de Natalidade.

4.2.7 Testes de Políticas

A ideia nesse passo é avaliar o comportamento das variáveis em conjunto criando hipóteses para aplicar as políticas. Busca-se através de simulações testar as hipóteses visando determinar a política mais significativa.

De acordo com a Projeção do crescimento Populacional há uma redução na população a partir de 2047. A política aplicada visa evitar um problema econômico.

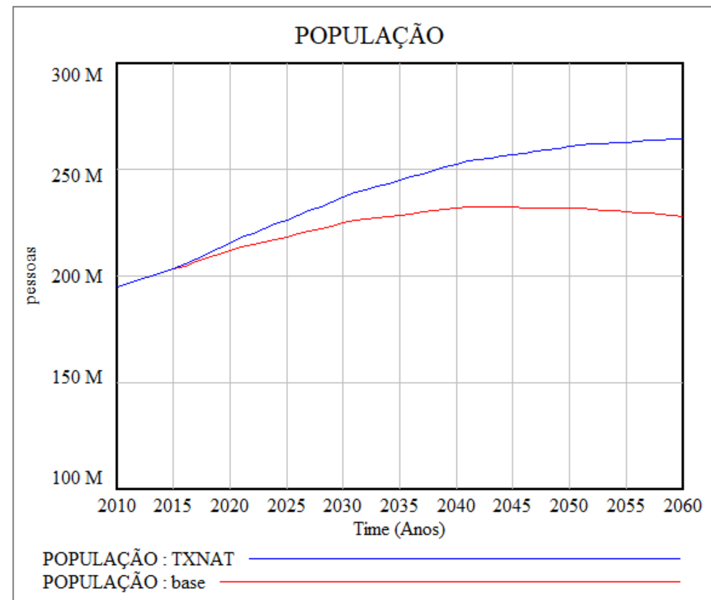
Faz-se uso de uma hipótese otimista.

- **Hipótese Otimista**

- Aplicar campanhas para aumento da natalidade - Taxa da Natalidade aumenta em 5% entre 2010 e 2020 - Taxa de Mortalidade constante

Na Figura 36 observa-se o resultado da hipótese otimista e a População Total para comparações.

Figura 36 – Hipótese Otimista versus População Total



Fonte: o autor

Na Tabela 4 pode-se melhor analisar os resultados obtidos.

Tabela 4 – Hipótese Otimista versus População Total

Ano	População Total	Hipótese Otimista
2010	194890682	194891000
2020	211755692	215555000
2030	224868462	236942000
2040	231919922	252516000
2050	232933276	260763000
2060	228286347	264642000

Fonte: o autor

O resultado esta de acordo com o esperado conforme é visto na Tabela 4, o aumento da taxa de natalidade leva a população há um crescimento mais rápido.

Abordou-se todos os itens descritos na *seção 3.1*, *Passos para Construção do Modelo*, além de expor detalhadamente as ferramentas de análise e simulação do programa Vensim. Na próxima seção apresenta-se o programa Powersim.

4.3 Powersim

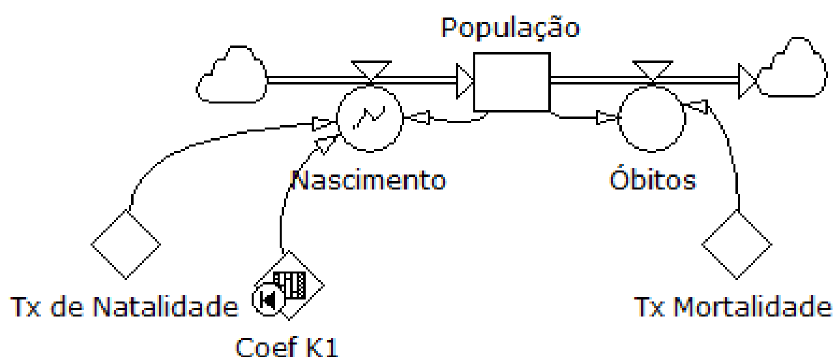
Após a compreensão da DS e habituar-se ao programa Vensim, torna-se natural a reprodução do modelo da Projeção de Crescimento Populacional no programa Powersim, com isso a abordagem nessa seção sera qualitativa.

O Powersim apresenta ferramentas para simulação e análise mais dinâmicas que o Vensim, tornando-o um programa mais interativo, porém sua configuração de paramêtros inicial pode causar alguns transtornos durante a sua utilização.

Ao iniciar um projeto novo precisa-se prestar atenção ao configurar o **tempo da resolução da Simulação** e o **timestep**, deve-se condicionar estes paramêtros com coerência, com isso procura-se evitar complicações ao simular o modelo. A projeção do Crescimento populacional continua sendo avaliada de 2010 à 2060 com os mesmos valores retirados da Tabela 1 seção *seção 4.1.2*. Configura-se o **tempo da resolução da Simulação** em 1 mês e o **timestep** em 12 meses.

A construção e equacionamento do diagrama DEF no Powersim é similar ao desenvolvido na seção *seção 4.2.2*. Deve-se obter após a operação o seguinte modelo, Figura 37.

Figura 37 – Diagrama DEF Completo - Powersim



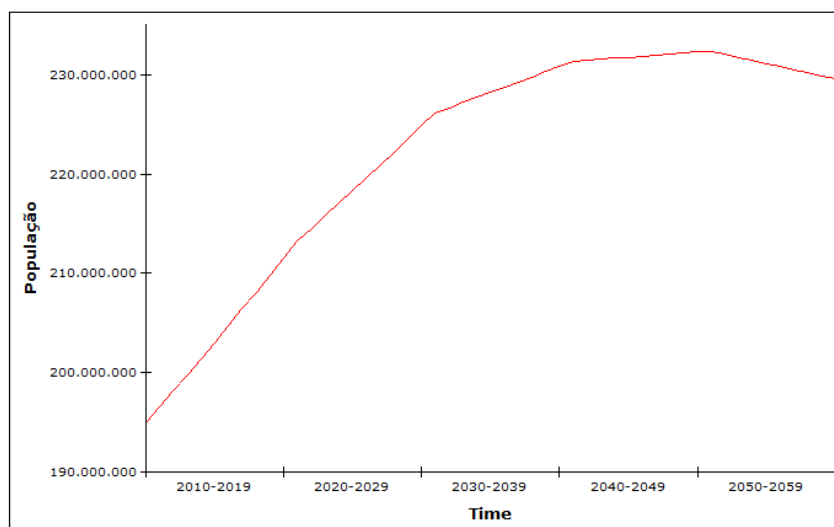
Fonte: o autor

No Powersim não utiliza-se a função lookup na variável *coeficiente de ajuste da população*, **Coef K1**, como visto anteriormente. Ao equacionar está variável altera-se o campo *Series type* para **Average** com isso permite-se alterar o valor do parâmetro em qualquer período desejado.

Com auxilio das ferramentas **Time Graph** e **Time table** pode-se visualizar gráficos e planilhas de qualquer variável do modelo. A variável **Coef K1** pode

ser alterado tanto na planilha quanto no gráfico. Após realizado o ajuste na variável **Coef K1** a cada 10 anos, alcança-se a seguinte projeção do crescimento populacional, Figura 38.

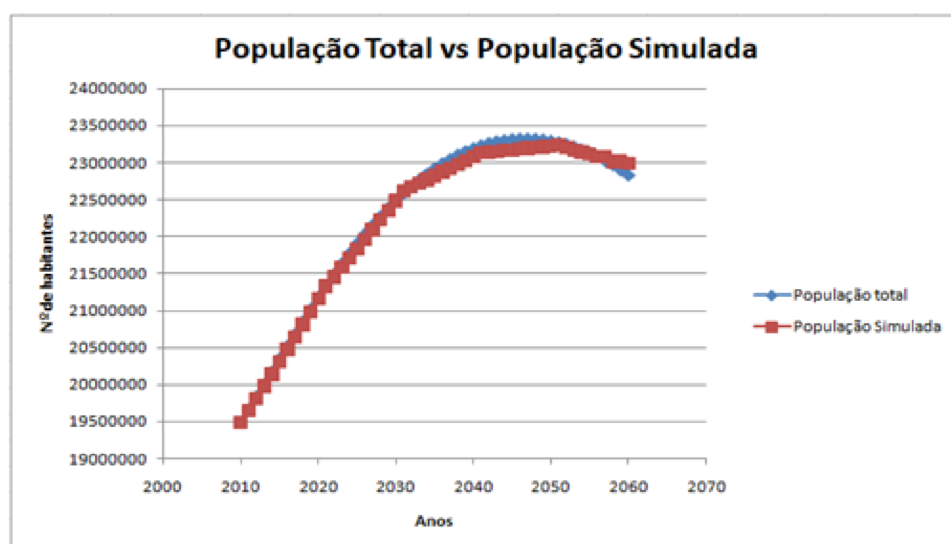
Figura 38 – Projeção do Crescimento Populacional - Simulado



Fonte: o autor

Nota-se que a projeção esta de acordo com o População Total (modo de referência) Figura 14. Visualiza-se a verificação de consistência do modelo desenvolvido no Powersim na Figura 39.

Figura 39 – Projeção da População Total vs População Simulada - Powersim



Fonte: o autor

Na Tabela 5 pode-se melhor analisar os resultados obtidos.

Tabela 5 – População Total vs População Simulada - Powersim

Ano	População Total	População Simulada	Erro
2010	194890682	194890682	0,0000%
2020	211755692	211542538	0,1007%
2030	224868462	224840301	0,0125%
2040	231919922	230805968	0,4803%
2050	232933276	232268847	0,2852%
2060	228286347	229548127	0,5527%

Fonte: o autor

Pode-se observar na Tabela 5 que há pouco variação em relação ao modo de referência, o modelo simulado esta de acordo com o passo 2 *Verificação de consistência* apresentando um erro médio de 0,28%.

Compara-se o resultado da projeção de crescimento populacional executados nos programas Vensim e Powersim, Tabela 6.

Tabela 6 – Projeção Vensim vs Projeção Powersim

Ano	Projeção Vensim	Projeção Powersim	Erro
2010	194891000	194890682	0,0002%
2020	211751000	211542538	0,0984%
2030	224858000	224840301	0,0079%
2040	231819000	230805958	0,4370%
2050	231905000	232268847	0,1569%
2060	228173000	229548127	0,6027%

Fonte: o autor

Praticamente não a diferença nos resultados da projeção. O erro observado na Tabela 6 está relacionado ao *Coeficiente de ajuste populacional*, que no Vensim usa-se a função Lookup e no Powersim não. Os próxímos passos não teriam alterações significativas ao serem aplicadas no Powersim.

5 Considerações Finais

Tendo em vista o objetivo do trabalho, primeiramente, foi suposto uma forma de analisar situações, como um único sistema, com o pensamento sistêmico e as outras quatro disciplinas desenvolvidas por Senge. Apresentou-se também oitos passos para a aplicação da técnica de Dinâmica de Sistema. Com os três primeiros passos define-se a análise teórica do problema, a parte qualitativa da DS, onde previamente identifica-se todas as variáveis que se relacionam no sistema e busca-se determinar qual variável apresenta potencial de alavancagem no sistema. É fundamental o conhecimento do diagrama de laço causal, assim como saber identificar os laços de realimentação de esforço ou equílibrio.

Os cinco passos restantes abordam a análise quantitativa da DS. O conhecimento prévio da técnica mostra-se necessário, principalmente, ao desenvolver o diagrama de estoque e fluxo, deve-se ter em mente que as variáveis de taxa, os fluxos, somente ligam-se as variáveis de estoque e que a ordem do sistema aumenta a cada variável de estoque adicionada e que está variável nunca é zero, mesmo que não haja fluxo.

Algumas ponderações sobre a utilização das ferramentas referentes a simulação e análise disponíveis nos programas.

O programa Vensim é uma adequada porta de entrada para a iniciantes interessados em aplicar a DS, um programa bem didático e com uma interface amigável. Além de ferramentas de simulação usuais, onde gera-se gráficos e tabelas de qualquer variável desejada, o programa disponibiliza as ferramentas **Causes Tree** e **Uses Tree** onde cria-se um gráfico em árvore das variáveis que se relaçionam com a variável selecionada. Com o conhecimento teórico está aplicação torna-se uma excelente ferramenta na análise de sistemas com uma quantidade excessiva de variáveis. Um ponto negativo desse programa na versão estudante é que não há possibilidade de exportação de tabelas ou planilhas eletrônicas.

O programa Powersim apresenta ferramentas diversas em sua interface. É um programa com mais recursos que o Vensim. Na versão estudante do Powersim é possível exportar arquivos excel e utilizar como uma variável do modelo. Outro ponto positivo é a facilidade de gerar a análise de sensibilidade dos modelos e de criar controles para controlar variáveis.

5.1 Conclusões

O modelo desenvolvido no trabalho referente a Projeção de Crescimento Populacional para fins de projeção de demanda de energia resultou como esperado, nele aplicou-se todos os oitos passos para a aplicação da técnica.

A Dinâmica de Sistema possibilita analisar sistemas em diversos cenários. Com a aplicação correta da técnica esclarece-se porque algumas decisões podem ser aplicadas, por exemplo, a curto prazo mas se a mesma for aplicada a longo prazo pode causar problemas diversos no sistema. Com os testes de políticas elabora-se diversas situações para identificar o comportamento do sistema.

A técnica de Dinâmica de sistemas aplicada com conhecimento teórico e o uso de programas de simulação, torna-se uma excelente ferramenta para tomadas de decisão, aplicação e elaboração de políticas em organizações que aprendem.

5.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do modelo ou construção de um novo modelo aplicado a situações distintas.

A Dinâmica de Sistemas é uma técnica que possibilita agrupar variáveis de diferentes naturezas em um mesmo modelo. Sugere-se procurer um sistema mutidisplinar que tenha características dinâmicas onde possa ser aplica a técnica.

Referências

ALVES, A. A. F. *Construção de cenarios de demanda no setor residencial-uma abordagem baseada em dinamica de sistemas*. 1997. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. 21, 23

BAUGARTEN, C. *Inserção de micro e mini geração distribuída de fonte solar fotovoltaica: uma abordagem através de dinâmica de sistemas*. 2014. Projeto de Diplomação, em Engenharia Elétrica, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 28

BORDIN, G. *Um Modelo para Estudos da Demanda de Energia Elétrica em Ambiente Competitivo*. 2000. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. 23, 27, 32

COYLE, G. *Qualitative and quantitative Modelling in System Dynamics: Some Research Questions. System Dynamics Review*. [S.l.]: Autumn House Press, 2000. 22

FELíCIO, L. C. *Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta*. 2. ed. [S.l.]: RiMa Editora, 2010. 3-6 p. ISBN 978-85-7656-169-9. 20

FORD, A. *Modelling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Sustems*. 1. ed. [S.l.]: Washinton: Island Press, 1999. 27

FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. [S.l.]: New York: John Wiley e Sons, 1961. 21, 24

FORRESTER, J. W. *Urban Dynamics*. [S.l.]: Pegasus Communications, Inc, 1969. 21

FORRESTER, J. W. *World Dynamics*. [S.l.]: Wright-Allen Press, 1971. 21

JANSEN, L. K. C. *Integração do Pensamento Sistemico em projetos Seis Sigmas*. 2009. 46-100 p. Tese doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos,USP. 19, 20, 22

MATOS, D. A. d. *Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materias através da dinâmica de sistemas*. 2012. 55 p. Tese doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos,USP. 20

PIDD, M. *Modelagem empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão*. [S.l.]: Editora Artes Médicas Sul LTDA, 1998. 119-120,163-191 p. ISBN 85-7307-352-7. 20, 21, 22, 23, 24, 25

POWERSIM, S. v. . *Powersim Studio version 10*. [S.l.], 2018. 31

SANTOS, A. M. d. *A aplicação de um Modelo de Simulação para o Gerenciamento de Projetos: Um Estudo de Caso Utilizado a Dinâmica de Sistema*. 2006. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo,USP. 24, 25

SENGE, P. M. *A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende*. 30. ed. [S.l.]: Editora Best Seller LTDA, 2014. 33-160 p. ISBN 978-85-7684-714-4. 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19

STERMAN, J. D. *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. McGraw Hill*. [S.l.]: Irwin/McGraw-Hill, 2000. 19, 22, 24

VENSIM, V. P. *User Guide - Vensim Introduction and Tutorials*. [S.l.], 2017. 28, 34

VILLELA, P. R. C. *Introdução à Dinâmica de Sistemas*. [S.l.: s.n.], 2005. 1-3 p. 20, 21, 22